

Die Wirksamkeit von Tageslichtreplikationen auf die Wissensarbeit

Von der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Dipl.-Ing. Designer Oliver Stefani
Geboren am 5. Januar 1970 in Miltenberg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder, Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dieter Spath, Universität Stuttgart

Tag der Verteidigung:

25. Oktober 2017

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand über einen langen Zeitraum neben meiner beruflichen Tätigkeit am Fraunhofer IAO. Dank des Forschungsprojektes OLIVE konnten tiefergehende Untersuchungen zu dynamischem Licht durchgeführt werden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder für die Betreuung der Arbeit, die fachlichen Diskussionen und Anregungen, die dieser Arbeit Impulse verliehen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei dem zweiten Gutachter Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. Dieter Spath von der Universität Stuttgart.

Ganz besonders richtet sich mein Dank an meine Kollegen und Studenten am Fraunhofer IAO, ohne die die technische Realisierung der Lichtsysteme sowie die zahlreichen Messungen und Untersuchungen nicht möglich gewesen wären.

Ein großer Dank gilt außerdem Dr.-Ing. Manfred Dangelmaier, der mir mit Diskussionen und kritischen Anmerkungen weiterhalf.

Ein überaus besonderer Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden, die mir über Schwierigkeiten, insbesondere während der letzten Monate, hinweggeholfen und jederzeit an mich geglaubt haben.

Kurzfassung

Mehr als 90% eines Tages verbringen Europäer im Durchschnitt innerhalb von Gebäuden. In der Vergangenheit orientierten sich die Empfehlungen für Innenbeleuchtung überwiegend an den visuellen Anforderungen. Wenn man aber von einer evolutionären Anpassung des Menschen an natürliche Lichtbedingungen ausgeht, müsste sich die Nachbildung von natürlichen Lichtbedingungen, die über die visuellen Anforderungen hinausgehen, in der künstlichen Raumbelichtung positiv auf Befinden und Leistung auswirken. Diese Arbeit geht der Frage „Welche Eigenschaften des natürlichen Lichts sind wichtig und sollten bei der Innenbeleuchtung nachgebildet werden?“ auf den Grund und leistet mit neuen Erkenntnissen zur Lichtwirkung einen Beitrag zur Wissenschaft. Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob sich eine technisch realisierte Lichtexposition, welche nach Qualität und Dynamik dem natürlichen Tageslicht ähnlicher ist als die heutige Standardbeleuchtung, positiv auf subjektive Befindlichkeiten und die Leistungsfähigkeit auswirkt. Ob und welche Dynamiken des natürlichen Lichts bei der Innenbeleuchtung nachgebildet werden sollten, um optimale Arbeitsbedingungen bei der Wissensarbeit zu schaffen, wird aus grundlegenden Untersuchungen zu dynamischem Licht abgeleitet. Schwerpunkt der Untersuchungen sind ultradiane Lichtwechsel.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	3
2.	Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1	Licht und Sehen	5
2.2	Das Lichtspektrum	5
2.3	Lichttechnische Grundgrößen	6
2.4	Gebräuchliche Beleuchtungssysteme	7
2.5	Menschliche Informationsverarbeitung.....	9
2.6	Wirkung von Licht auf den Menschen über das Auge.....	10
2.6.1	Lichtwirkung auf Stimmung und Emotion.....	13
2.6.2	Lichtwirkung auf das Autonome Nervensystem (ANS)	15
2.6.3	Lichtwirkung auf den zirkadianen Rhythmus	15
2.6.4	Lichtwirkung auf die Gesundheit.....	17
2.6.5	Lichtwirkung auf Arbeitsleistung und kognitive Funktionen.....	17
2.6.6	Lichteinflüsse von Displays	18
2.7	Bewertungsmethoden zur nicht-visuellen Lichtwirkung auf den Menschen.....	19
2.8	Eigenschaften und Auswirkung von natürlichem Licht auf den Menschen	22
2.8.1	Intensität	22
2.8.2	Spektrum	23
2.8.3	Polarisation.....	24
2.8.4	Lichtverteilung.....	24
2.8.5	Dynamik.....	26
2.9	Individuelle Erkenntnisse zum Nutzerverhalten	29
2.10	Fazit zum Stand der Wissenschaft.....	30

3.	Akzeptanzuntersuchungen zu ultradianem Lichtwechsel.....	32
3.1	Eingesetzte Instrumente	33
3.1.1	VGZ Fragebogen: Online-Fragebogen zum augenblicklichen Befinden	33
3.1.2	Attention Network Test (ANT).....	34
3.2	Technische Spezifikationen des Lampenprototyps	34
3.3	Methodik und Versuchsbedingung	36
3.3	Verwendete statistische Methoden.....	37
3.4	Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchungen	37
3.4.1	Fragebogen zum augenblicklichen Befinden (VGZ).....	37
3.4.2	Attention Network Test (ANT).....	38
3.4.3	Ergebnisse der offenen Fragen.....	38
3.3	Schlussfolgerungen der Akzeptanzuntersuchungen	41
3.4	Ergebnisse von Probandeninterviews zu bevorzugten Lichtstimmungen	42
4.	Die Wirkung ultradianer örtlich dynamischer Beleuchtung auf subjektives Befinden	44
4.1	Eingesetzte Instrumente	44
4.1.1	Eingangsfragebögen	44
4.1.2	Messung der subjektiven Müdigkeit	44
4.1.3	Analoge Skala zum subjektiven Gefallen der Lichtszenarios.....	45
4.1.4	Fragebogen zur subjektiven Einschätzung der Befindlichkeit.....	45
4.2	Versuchsanordnung.....	46
4.3	Lichteigenschaften	48
4.3.1	Technische Spezifikation	48
4.3.2	Lichtszenarien.....	49
4.3.3	Bewertung der psychologischen Blendung	52
4.3.4	Visuelle & nicht-visuelle Lichtwirkung.....	54
4.4	Probandenkollektiv	56
4.5	Versuchsablauf	58
4.6	Ergebnisse der Untersuchungen zur örtlich dynamischen Beleuchtung	60

4.6.1	Müdigkeit am Morgen.....	60
4.6.2	Dokumentation der Tätigkeiten der Probanden	62
4.6.3	Zusammenhang zwischen Tätigkeit und subjektivem Gefallen der Lichtszenarien	63
4.6.4	Tagesverlauf der subjektiven Einschätzung des Befindens	65
4.6.5	Subjektives Befinden am Abend.....	69
4.6.6	Veränderung der subjektiven Einschätzung des Befindens	71
4.6.7	Subjektive Müdigkeit am Abend	71
4.6.8	Veränderung der subjektiven Befindlichkeiten „Aktiviertheit“ und „Energierlosigkeit“	72
4.6.9	Ergebnisse der offenen Fragen.....	73
4.6.10	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	76
5.	Die Wirkung ultradianer zeitlich dynamischer Beleuchtung auf Leistung und ANS	79
5.1	Eingesetzte Instrumente	80
5.1.1	Herzratenvariabilität	80
5.1.2	Konzentrationstest: Test d2	82
5.1.3	Kreativitätstest: TSD-Z	83
5.1.4	Fragebogen zur Einschätzung der subjektiven Befindlichkeit.....	84
5.2	Versuchsanordnung.....	85
5.3	Lichteigenschaften	87
5.3.1	Technische Spezifikation	87
5.3.2	Lichtszenarien.....	88
5.3.1	Bewertung der psychologischen Blendung	89
5.3.2	Visuelle und nicht-visuelle Lichtwirkung	90
5.4	Probandenkollektiv	90
5.5	Versuchsablauf	90
5.6	Ergebnisse des Experiments mit ultradianer zeitlich dynamischer Beleuchtung	91
5.6.1	Ergebnisse des mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens	91
5.6.2	Ergebnisse der Karolinska Sleepiness Scale.....	94
5.6.3	Ergebnisse des Tests zum schöpferischen Denken (TSD-Z).....	97

5.6.4	Ergebnisse Test d2	98
5.6.5	Ergebnisse der Herzratenvariabilität (HRV).....	100
5.6.6	Subjektives Gefallen der Lichtszenarien.....	102
5.6.7	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	103
5.6.8	Weitere Ergebnisse	106
6.	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	106
6.1	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen dieser Arbeit	106
6.2	Empfehlungen zur menschenorientierten Beleuchtung	108
7.	Ausblick	110
	Verzeichnisse	CXI
	Abbildungsverzeichnis.....	CXI
	Tabellenverzeichnis	CXIII
	Formelverzeichnis	CXIII
	Abkürzungsverzeichnis	CXIV
	Literaturverzeichnis.....	CXVI

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Seit vielen Jahrtausenden hat sich der Mensch überwiegend im Freien aufgehalten und gearbeitet. Erst seit der industriellen Revolution vor ca. 150 Jahren leben Menschen in industrialisierten Ländern überwiegend in geschlossenen Räumen. Im Durchschnitt verbringen Europäer 22,25 Stunden am Tag innerhalb von Gebäuden (Schweizer et al. 2007). Das sind mehr als 90% eines Tages. Fabrikhallen, Büros, Besprechungszimmer, Einkaufszentren, Krankenhäuser, Altersheime und viele andere Einrichtungen sind oft nur mit wenig Fenstern ausgestattet oder gänzlich vom Tageslicht isoliert. Folglich sind wir überwiegend künstlicher Beleuchtung ausgesetzt. Wenn man von einer evolutionären Optimierung des Menschen für natürliches Licht ausgeht, müsste sich die Nachbildung von natürlichen Lichtbedingungen in der künstlichen Raumbelichtung positiv auf Befinden und Leistung auswirken. Lässt man hingegen Eigenschaften des natürlichen Lichts wie z. B. Spektrum und Dynamik beim Kunstlicht außer Acht, könnte dies Probleme verursachen. Der Mangel an natürlichem Tageslicht kann z. B. Depressionen und Schlafstörungen hervorrufen (Lewy et al. 1980; Rosenthal et al. 1984; Terman et al. 1995; Mishima et al. 2000; Hébert et al. 2002). Die Weltgesundheitsorganisation sagt voraus, dass bis zum Jahre 2030 Depressionen weltweit die zweithäufigsten und in Ländern mit hohem Einkommen die häufigsten Krankheiten sein werden (Mathers und Loncar 2006). Schlafstörungen verursachen einen durchschnittlichen Produktivitätsverlust von 5,5%. Der durchschnittliche Produktivitätsverlust bei Schlaflosigkeit ist 6,1% (Rosekind et al. 2010). Ein gesunder und ausreichender Schlaf ist folglich wichtig, um tagsüber produktiv zu sein.

Welche Eigenschaften des natürlichen Lichts sind wichtig und sollten bei der künstlichen Raumbelichtung nachgebildet werden? Wissenschaftlich gesichert ist bisher nur die Kopplung menschlicher Rhythmen an zirkadiane Lichtrhythmen (also Tag-Nachtrhythmus), eine Desynchronisation führt zu zahlreichen negativen Effekten beim Menschen (vgl. Kapitel 2). Der Nachweis, dass auch schnellere Lichtveränderungen des natürlichen Lichts (wie z. B. wetterbedingte Lichtveränderungen) nachgebildet werden müssten, um optimale Arbeitsbedingungen zu schaffen, ist noch nicht vollständig wissenschaftlich geklärt. Darum sind grundlegende Untersuchungen zu dynamischem Licht notwendig.

Vom Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) gibt es mit der „DIN SPEC 67600:2013-04 Biologisch wirksame Beleuchtung – Planungsempfehlungen“ bereits Bestrebungen, die Wirkungen von Licht auf den Menschen in Form von Empfehlungen für die richtige Beleuchtung nutzbar zu machen. Zu diesen Planungsempfehlungen gibt es jedoch auch kritische Einwände von der Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) in Form eines Positionspapiers zum Thema „künstliche, biologisch wirksame

Beleuchtung in der Normung“, welches zum Ausdruck bringt, dass die Normung im Bereich „Anforderungen oder Empfehlungen für die Planung und den Betrieb künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung an Arbeitsplätzen“ noch „nicht sinnvoll“ bzw. „noch nicht einmal zulässig“ sei, da es aus Sicht der KAN bei der DIN SPEC 67600 noch an ausreichend gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen fehle (Kommission Arbeitsschutz und Normung 2015). Dieser Konflikt zeigt wie brisant dieses Thema ist und dass hierzu noch Forschungsbedarf besteht.

Das allgemein zunehmende Bewusstsein für die Wirkung des Lichts auf den Menschen zeigte die „Light+Building 2016“, die sich 2016 dem Thema „Human Centric Lighting – HCL“ widmete. Die Light+Building ist eine Messe für Licht, Design und intelligente Gebäudetechnik mit Herstellern und Besuchern aus aller Welt. Diese Ausrichtung lässt folglich auch auf ein zunehmend wirtschaftliches Interesse an HCL schließen.

Besonders bei der Wissensarbeit, die meist in Büros durchgeführt wird, ist es wichtig den Menschen bei seiner Leistung optimal durch Umgebungseinflüsse zu unterstützen. Wie wichtig die Arbeitsumgebung für einen Arbeitnehmer ist zeigt der StepStone Employer Report 2011: eine gutes Arbeitsumfeld steht an erster Stelle und dominiert selbst finanzielle Anreize (Stepstone 2011). Zum Arbeitsumfeld gehört auch eine optimal Lichtumgebung, welche als wichtigstes Kriterium für einen idealen Büroarbeitsplatz gilt (Union Investment 2011).

1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit geht der Frage „Welche Eigenschaften des natürlichen Lichts sind wichtig und sollten bei der künstlichen Raumbeleuchtung nachgebildet werden?“ auf den Grund und leistet mit neuen Erkenntnissen zur Lichtwirkung einen Beitrag zur Wissenschaft.

Ziel dieser Arbeit ist es, Empfehlungen zur menschenorientierten Beleuchtung bei der Wissensarbeit aus dem Stand der Wissenschaft und aus neuen Erkenntnissen der Lichtwirkungsstudien dieser Arbeit abzuleiten. Das zentrale Ziel ist die Beantwortung der Frage, ob sich eine technisch realisierte Lichtexposition, welche dem natürlichen Tageslicht ähnlicher ist als die heutige Standardbeleuchtung, positiv auf subjektive Befindlichkeiten und die Leistungsfähigkeit auswirkt. Im Idealfall soll die Nachbildung von natürlichen Lichtveränderungen so optimiert werden, dass die positiven Lichtwirkungen auf den Menschen auch bei Kunstlicht nutzbar gemacht werden können.

Schwerpunkt der Lichtwirkungsstudien dieser Arbeit sind ultradiane Lichtwechsel. Als ultradiane Lichtwechsel werden im Folgenden Lichtveränderungen bezeichnet, welche kürzer als der zirkadiane Hell-Dunkel-Rhythmus eines Tages sind. Ultradiane Lichtwechsel können in der Natur zeitlich und örtlich auftreten (z. B. beim Wolkenzug) oder nur zeitlich wahrgenommen werden (z. B. beim indirekten Beobachten des entstehenden Schattens bei der Verdeckung der Sonne durch eine Wolke).

Ziel dieser Arbeit ist es, Hinweise für die Gestaltung ultradianer Lichtveränderungen mit Kunstlicht zu geben. Diese sollen aus den Untersuchungen zur Lichtwirkung, von sowohl örtlich und zeitlicher Lichtveränderungen, als auch aus ausschließlich zeitlicher Lichtveränderungen abgeleitet werden.

Ein differentieller Effekt bezüglich der Art der Tätigkeit wäre eine wichtige Voraussetzung für eine gezieltere Nutzung und Weiterentwicklung ultradianer Lichtwechsel nach Anforderungsprofil der Arbeitssituation.

Ausgehend von diesen Zielstellungen ergibt sich der in Abbildung 1 dargestellte Aufbau der Arbeit.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Zunächst werden Grundlagen zu Licht und zu dessen Wirkung auf den Menschen über das Auge dargestellt. Anschließend werden natürliche Lichtbedingungen den Lichtbedingungen bei Kunstlicht gegenübergestellt und daraus abgeleitet, welche Eigenschaften des natürlichen Lichts wichtig sind und nicht vernachlässigt werden sollten.

Um im Vorfeld von technisch komplexen Lichtinstallationen zunächst die Akzeptanz und Wirkung von nachgebildeten natürlichen Lichtwechseln mit künstlicher Beleuchtung zu untersuchen, wird eine Studie in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Neurowissenschaften und Lernen Ulm (ZNL) durchgeführt. Der Begriff der Akzeptanz ist hierbei wie bei der Akzeptanzforschung im arbeitswissenschaftlichen Umfeld zu verstehen: Die Akzeptanzforschung soll bei technischen Innovationen frühzeitig unerwünschte Auswirkungen erkennen und verhindern (Reichwald 1978; Schönecker 1985). Die Akzeptanzuntersuchung wird mit einer kleinen Probandengruppe durchgeführt, um festzustellen, ob ultradiane Lichtwechsel bei der Büroarbeit einsetzbar sind oder störend auf die Wissensarbeit wirken. Des Weiteren werden verschiedene Frequenzen der Dynamik getestet, um die optimale Frequenz der Lichtwechsel zu bestimmen. Zur Eruiierung des Einflusses der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit werden abwechselnd zu den Büroarbeiten Aufmerksamkeitstests durchgeführt. Ziel dieser Akzeptanzuntersuchung ist die Feststellung der Akzeptanz von ultradianen Lichtwechseln sowie die Ermittlung der bevorzugten Frequenz der ultradianen Dynamiken, um diese für die folgenden Studien festzulegen. Die Akzeptanzuntersuchung soll außerdem klären, ob und welche Effekte sich bei der kognitiven Leistungsfähigkeit zeigen, sodass für die folgenden Studien die geeigneten Instrumente ausgewählt werden können.

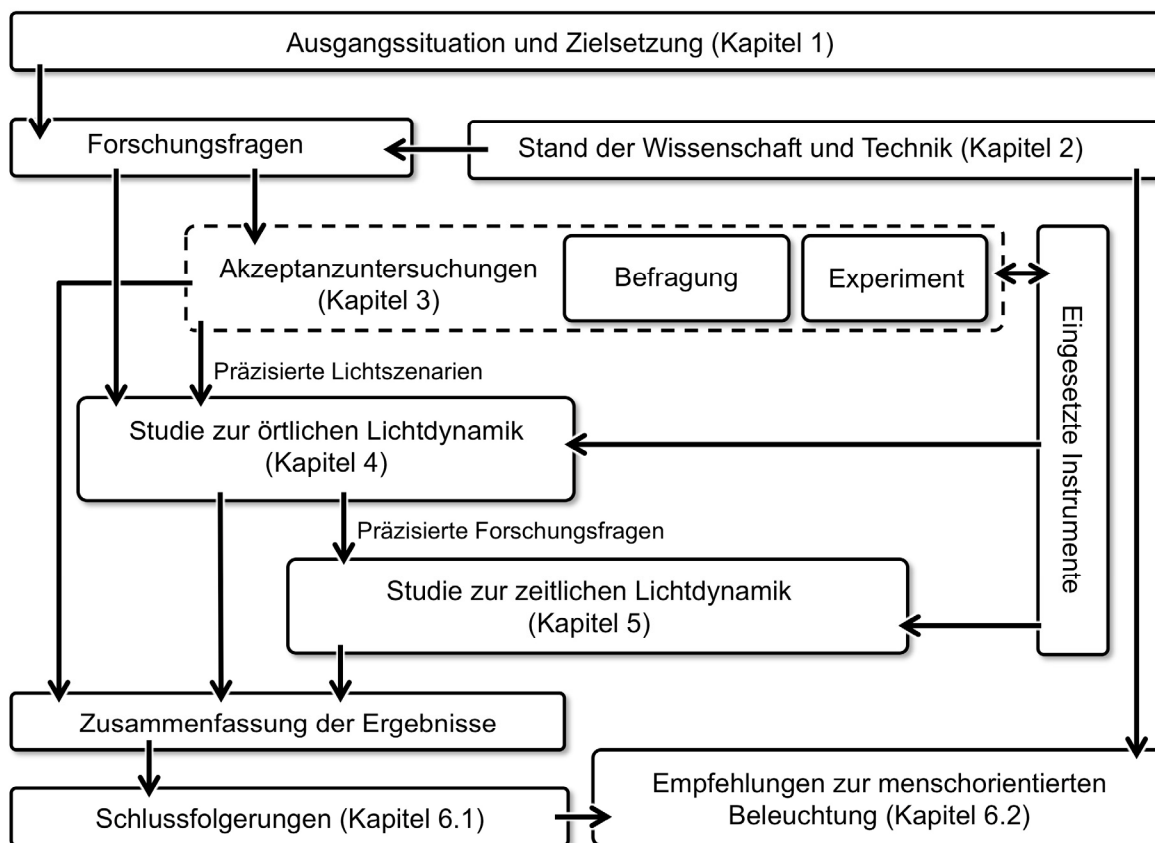


ABBILDUNG 1: AUFBAU DER ARBEIT

Die Beleuchtung für diese Untersuchung muss nicht nur die dynamischen Lichtwechsel ermöglichen, sondern soll die aktuellen Qualitätsstandards für Licht erfüllen. Um die spektrale Zusammensetzung des Lichts zu optimieren und die ultradianen Lichtwechsel zu realisieren, bieten LEDs ideale Voraussetzungen, da sie in zahlreichen Spektralfarben erhältlich sind und durch Pulsweitenmodulation präzise hinsichtlich des abgegebenen Lichtstroms steuerbar sind. Da Weiß-LEDs spektral bei Weitem nicht dem breitbandigen und spektral lückenlosen Tageslicht entsprechen (siehe Kapitel 2), werden verschiedenfarbige LEDs ausgewählt und in einer Leuchte integriert.

In einem weiteren Experiment wird untersucht, ob und wie die zeitliche und örtliche Dynamisierung von Kunstlicht die Befindlichkeiten von Probanden im Laufe eines Arbeitstages bei der Wissensarbeit beeinflussen kann. Für die Durchführung des Experiments wird der am Fraunhofer IAO entwickelte „Virtual-Sky“ eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein an der Decke montiertes Beleuchtungspanel, welches durch zeitliche und örtliche Variationen von Lichtfarbe und -intensität das natürliche Wolkenspiel nachbilden kann. Aus diesem Experiment sollen Erkenntnisse gewonnen werden, ob und wie dynamisches Licht bei der Büroarbeit eingesetzt werden kann. Die Hypothese, dass ultradiane Lichtwechsel im Vergleich zu statischem Licht zu weniger Ermüdung und zur Verbesserung der subjektiven Befindlichkeiten bei der Büroarbeit führen, wird überprüft. Diese Untersuchung wird in

Abbildung 1 und im Folgenden „Studie zur örtlichen Lichtdynamik“ oder kurz „Virtual-Sky-Studie“ genannt. Zeitliche Veränderungen gehen unweigerlich mit den örtlichen Veränderungen einher.

In einer weiteren Studie werden zur Präzisierung der Erkenntnisse aus den Ergebnissen der vorangegangenen Studien spezifische, isolierte Dynamiken detaillierter untersucht. Es werden die Auswirkungen einer zeitlichen Abfolge von Lichtwechsel auf Befinden und Leistung untersucht. Hierbei werden bei den Untersuchungen unterschiedliche Tätigkeiten, wie z. B. kreative Tätigkeiten oder Tätigkeiten, die eine hohe Konzentration erfordern, untersucht. Unter möglichst kontrollierten Bedingungen soll auch die Lichtwirkung durch physiologische Messungen objektiviert werden. Diese Untersuchung wird in Abbildung 1 und im Folgenden „Studie zur zeitlichen Lichtdynamik“ genannt.

Basierend auf den Untersuchungsergebnissen werden Empfehlungen für den Einsatz von dynamischem Licht bei Tätigkeiten der Wissensarbeit abgeleitet.

2. Stand der Wissenschaft und Technik

2.1 Licht und Sehen

Licht ist elektromagnetische Strahlung und zeigt die Eigenschaften von Teilchen und von Wellen, je nach Betrachtungssituation. Bei der Ausbreitung von Licht ist dieses als Welle anzusehen, in seiner Wechselwirkung mit Materie ist hingegen die Beschreibung als Teilchen geeignet. Die visuelle Wahrnehmungen des Menschen ist ohne Licht nicht möglich und ihre hohe Relevanz wird deutlich, wenn man deren Anteil an allen menschlichen Sinneswahrnehmungen betrachtet: Er beträgt etwa 85 Prozent (Fisch 2000). Die wichtigste Eigenschaft des Lichts für den Menschen ist somit die Ermöglichung des Sehens. Zum Sehen enthält das Auge zwei Arten von photosensitiven Zellen, „Zäpfchen“ und „Stäbchen“. Die „Zäpfchen“ dienen dem Farbsehen bei ausreichender Helligkeit und die Stäbchen dem Sehen von Graustufen in dunklen Umgebungen. Daher sind auch die Begrifflichkeiten „photopisches Sehen“ oder „Tagsehen“ und „skotopisches Sehen“ oder „Nachtsehen“ gebräuchlich. Wenn Licht diese Sehzellen erreicht, werden komplexe elektrochemische Prozesse in Gang gesetzt. Betrachtet man zunächst nur die visuelle Wirkung von Licht, werden elektrische Impulse über Nervenbahnen an den visuellen Cortex geleitet. Die nicht-visuelle Wirkung von Licht wird in Kapitel 2.5 beschrieben.

2.2 Das Lichtspektrum

Die optische Strahlung umfasst ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) im Wellenlängenbereich von 200 bis 400 Nanometern (UV-Strahlung lässt sich unterteilen in UV-A-, UV-B- und UV-C-Strahlung), sichtbares Licht mit Wellenlängen von 400 bis 760 Nanometern und infrarote Strahlung von 760 Nanometern bis zu einem Millimeter Wellenlänge. Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts bestimmt die

Empfindung der Lichtfarbe im Auge. Licht mit niedrigen Wellenlängen um 420 Nanometer wird als blaues Licht wahrgenommen, während wir Licht einer Wellenlänge von 555 Nanometern als Grün und Licht um 700 Nanometer als Rot wahrnehmen. Sichtbares Licht ist nur ein kleiner Ausschnitt des gesamten elektromagnetischen Spektrums (Ditzinger 2013).

2.3 Lichttechnische Grundgrößen

Die vier wichtigsten lichttechnischen Grundgrößen der Photometrik, also der auf der Empfindlichkeit des menschlichen Auges beim Tagsehen basierenden Lichtmessung, sind der Lichtstrom, die Lichtstärke, die Leuchtdichte und die Beleuchtungsstärke (Pedrotti et al. 2005). Ihr formaler Zusammenhang ist in Tabelle 1 dargestellt.

TABELLE 1: LICHTTECHNISCHE GRUNDGRÖßEN

Benennung	Zeichen	Formel	Einheit
Lichtstrom	Φ		lm
Lichtstärke	I	$I = \Phi / \Omega$	cd = lm/sr
Leuchtdichte	L	$L = I / A$	cd/m ²
Beleuchtungsstärke	E	$E = \Phi / A$	lx = lm/m ²

Der in Lumen gemessene Lichtstrom ist die gesamte von einer Lichtquelle ausgehende Strahlung, angepasst an das visuelle Wahrnehmungsvermögen des menschlichen Auges. Er ist somit eine relativ zur visuellen Empfindlichkeit des Auges betrachtete Größe und ist nicht an die Empfindlichkeit anderer biologischer Vorgänge im Auge, wie die nicht-visuelle Wirkung von Licht, angepasst (vgl. Kapitel 2.5). Als Lichtstärke wird der Lichtstrom bezeichnet, welcher in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird, also der Lichtstrom pro Raumwinkel Ω . Die Einheit für die Lichtstärke lautet Candela. Als Leuchtdichte wird die Lichtstärke je Quadratmeter der Lichtquelle oder reflektierenden Oberfläche bezeichnet, sie wird in Candela pro Quadratmeter gemessen. Die Leuchtdichte ist vom Objekt und vom Standpunkt des Beobachters abhängig und bestimmt die wahrgenommene Helligkeit. Die Beleuchtungsstärke ist der Lichtstrom je Fläche A , gemessen in Lux. Die Messung der photometrischen Größen erfolgt mit Photometern. Es kann zwischen Sendergrößen, also der Messung des von einer Strahlungsquelle ausgehenden Lichts (Lichtstrom und Lichtstärke), und Empfängergrößen, also der Lichtintensität einer beleuchteten Fläche oder eines beleuchteten Raumes (Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte), unterschieden werden (Abbildung 2).

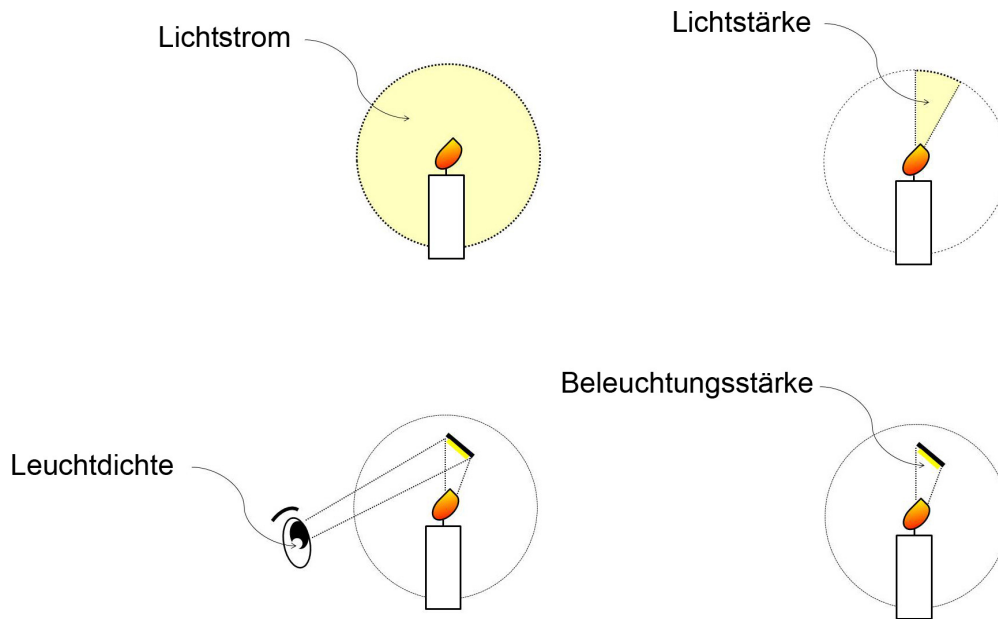


ABBILDUNG 2: LICHTTECHNISCHE GRUNDGRÖßEN

2.4 Gebräuchliche Beleuchtungssysteme

Heutzutage werden in Beleuchtungssystemen noch Halogenglühlampen, häufig Leuchtstoffröhren und immer öfter auch LEDs verwendet.

Das Licht der verschiedenen Quellen kann spektral kontinuierlich verteilt sein oder aus einzelnen Spektrallinien bestehen. Man unterscheidet typischerweise zwischen Temperaturstrahlern und Lumineszenzstrahlern. Zu den Temperaturstrahlern zählen sogenannte „schwarze Strahler“ (auch planckscher Strahler), Glühlampen und hochintensive Lichtbogenquellen. Zu den Lumineszenzstrahlern gehören die Entladungslampen (z. B. Leuchtstoffröhren, Quecksilberdampf lampen, HID-Lampen, Blitzröhren, PKW-Xenonlicht), Halbleiterdioden (LED und OLED) und kohärente Lichtquellen (Laser). Bei den Temperaturstrahlern wird die zugeführte Energie in Wärme umgewandelt und anschließend als Strahlung abgegeben. Bei den Lumineszenzstrahlern wird die Energie direkt in innere Energie umgewandelt (z. B. durch Anregung von Elektronen). Die Strahlung wird dann durch einen Fluoreszenzprozess wieder abgegeben (Pedrotti et al. 2005).

Glühlampen sind durch höhere Beleuchtungsstärken bei größeren Wellenlängen, also im Bereich roten und infraroten Lichts gekennzeichnet und strahlen nur wenig blaues Licht und praktisch kein UV-Licht ab. Sie werden hauptsächlich in Wohnräumen verwendet und setzen einen Großteil der verbrauchten Energie in thermische Strahlung um. Zu den Leuchtstoffröhren zählen auch die sogenannten Energiesparlampen. Quecksilber- und Natriumhochdruck-Dampfleuchten werden mit ihrer

orangegelben oder blauen Strahlung beispielsweise für Straßenbeleuchtungen eingesetzt. Die Spektren gebräuchlicher Leuchtmittel sind in Abbildung 3 dargestellt.

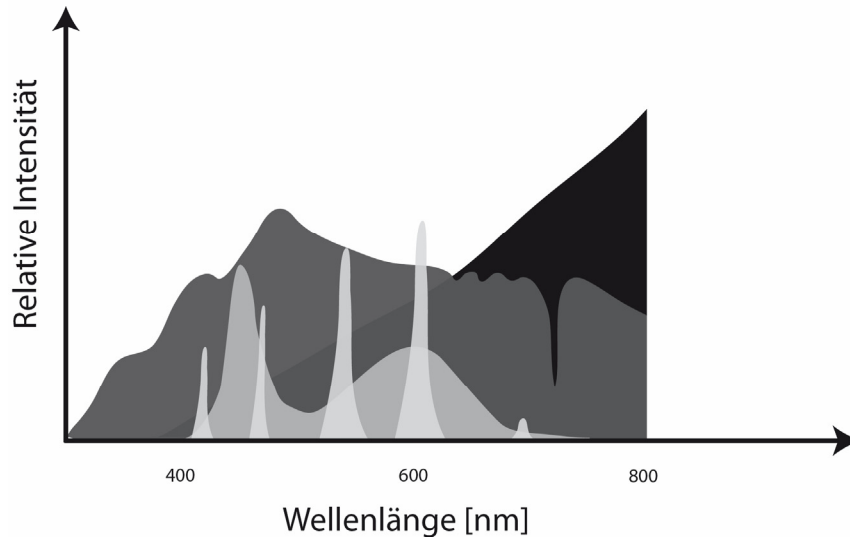


ABBILDUNG 3: SPEKTREN GEBRÄUCHLICHER LEUCHTMITTEL IM VERGLEICH ZU TAGESLICHT (VON HELL NACH DUNKEL: LEUCHTSTOFFRÖHRE, WEIß-LED, TAGESLICHT, GLÜHLAMPE)

Von hellgrau zu schwarz bzw. von vorne nach hinten: Leuchtstoffröhre mit fünf Spektrallinien, Weiß-LED, natürliches Tageslicht (vgl. Kapitel 2.7.2) und Glühlampe mit überwiegender Infrarotanteilen weit über das sichtbare Spektrum hinaus. Bei der Weiß-LED ist an den ausgeprägten, schmalbandigen kurzen Wellenlängen zu erkennen, dass diese mit einem blauen Chip betrieben wird, durch welchen blaues Licht auf eine Leuchtstoffbeschichtung trifft, welche wiederum das kurzwellige Licht des blauen Chips in ein breitbandigeres, langwelligeres Licht umwandelt. Dadurch entsteht das typische LED-Spektrum mit einer Lücke bei Cyan und einem breitbandigen Bauch bei Gelb. Das langwellige Rot ist je nach verwendetem Leuchtstoff meist nur schwach ausgeprägt. Als verwendete Leuchtmittel im Bürobereich ist hauptsächlich von Leuchtstoffröhren oder LEDs auszugehen. Inwiefern die Eigenschaften dieser Systeme den vielseitigen menschlichen Anforderungen an Beleuchtung genügen wird durch die Betrachtung ihrer Wirkungen in Kapitel 2.7 erläutert.

Bei von einer Leuchte ausgestrahltem weißem Licht können die Töne Warmweiß, Neutralweiß und Tageslichtweiß unterschieden werden. Diese lassen sich durch die ähnlichste Farbtemperatur klassifizieren, also die Temperatur eines schwarzen Körpers (schwarzer Strahler), wenn er Licht einer vergleichbaren Farbe abgibt (Bartenbach und Witting 2009). Ein schwarzer Körper ist ein idealisierter Absorber, der jegliche auftreffende Strahlung vollständig absorbiert. Eine schwarze Höhle mit einem kleinen Eingang oder ein Schmelzofen mit einer kleinen Öffnung sind gute Beispiele: Licht das von außen eintritt wird vollständig absorbiert. Wenn sich im Innern gleichzeitig eine thermische

Strahlungsquelle befindet, wie z. B. flüssiges Eisen im Schmelzofen, so hängt die Intensität der verschiedenen Wellenlängen, welche durch die thermischen Strahlung entstehen, nur von der Temperatur des schwarzen Körpers ab und nicht von seiner Reflexion (Bartenbach und Witting 2009).

Die meisten glühenden Körper sind allerdings keine idealen schwarzen Körper. Am Beispiel von Eisen lässt sich die Farbtemperatur erklären: Wird Eisen zunächst nur erwärmt, spürt man die abgegebene Infrarotstrahlung (um ca. 1000 nm) nur und kann sie noch nicht sehen. Wird das Eisen weiter erhitzt, beginnt es rot zu glühen und unser Auge sieht dessen emittierten Wellenlängen um 650 nm. Wird das Eisen weiter auf ca. 3000 Kelvin erhitzt, entstehen zusätzlich auch kürzere Wellenlängen (bei großer Hitze bewegen sich die Atome mit höherer Frequenz und emittieren somit kürzere Wellenlängen). Die Mischung aus rotem Licht und kürzeren Wellenlängen ergibt einen warmen Weißton. Warmweiß ist darum durch Temperaturen um 3000 Kelvin gekennzeichnet. Wird das Eisen noch weiter erhitzt nehmen die kürzeren Wellenlängen weiter zu und mischen sich zu Neutralweiß, welches bei Temperaturen von 3000 bis 5000 Kelvin entsteht. (Farb-) Temperaturen von über 5000 Kelvin werden als Tageslichtweiß oder Kaltweiß bezeichnet, da bei diesen Temperaturen sehr viele Blauanteile bzw. sehr viele kurze Wellenlängen enthalten sind, die durch sich sehr schnell bewegende Atome bei großer Hitze entstanden sind (Bartenbach und Witting 2009).

2.5 Menschliche Informationsverarbeitung

Um mögliche Lichteinflüsse bei der Wissensarbeit zu identifizieren, ist es hilfreich zunächst die menschliche Informationsverarbeitung in seine Bestandteile zu zerlegen. Luczak (Luczak und Volpert 1997) hat die menschliche Informationsverarbeitung in einem Modell in folgende Prozesse unterteilt:

- sensorische Arbeit: Bei der sensorischen Arbeit wird ein Eingangssignal entdeckt und wahrgenommen, es werden folglich Informationen aufgenommen.
- diskriminatorische Arbeit: Hierbei wird das Eingangssignal gefiltert und einem Begriff oder bestehenden Modell zugeordnet.
- kombinatorische Arbeit: Hier werden Entscheidungen getroffen. Aus verschiedenen Reaktionsmöglichkeiten wird eine Handlungsvariante ausgewählt.
- signalisatorisch-motorische Arbeit: Die Informationsausgabe erfolgt im Rahmen der signalisatorisch-motorischen Arbeit. Hier erfolgt die eigentliche Handlung. Übliche Formen bei der Wissensarbeit sind Schrift oder Sprache.

Für die Beleuchtung bedeutet dies, dass jeder dieser vier Prozesse optimal unterstützt werden sollte und sich die Eigenschaften des Lichts möglicherweise für jeden Prozess unterscheiden müssen. Aus wissenschaftlicher Sicht ergibt sich daraus ein Forschungsinteresse an der Wirkung von Licht auf die Befindlichkeit und Leistung bei den einzelnen Prozessen der Wissensarbeit.

Da die Informationsverarbeitung beim Menschen ein biologischer Prozess ist, der ständig zu einer Veränderung der synaptischen Verbindungen führt und sehr komplex ist, kann es sich bei den oben genannten Prozessen nur um ein Modell handeln, da die Informationsverarbeitung beim Menschen aus neurowissenschaftlicher Sicht fast vollständig parallel abläuft (Rösler 2011).

2.6 Wirkung von Licht auf den Menschen über das Auge

Über das menschliche Auge aufgenommenes Licht kann, schematisch vereinfacht, Wirkungen in drei unterschiedlichen Gehirnregionen aufweisen: Visuell (vgl. Kapitel 2.1) im visuellen Cortex, nicht-visuell oder zirkadian in der inneren Uhr (suprachiasmatic nucleus, kurz SCN) und emotional im limbischen System. Abbildung 4 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Lichtwirkungen.

Die Wirkmechanismen über das zirkadiane System sind erst seit wenigen Jahren bekannt. 2000 hat Provencio (Provencio et al. 2000) neben den Stäbchen und Zäpfchen weitere photosensitive Zellen im Auge entdeckt, die nicht dem Sehen dienen, sondern auf anderen Nervenbahnen *nicht* mit dem Sehzentrum im Gehirn sondern mit der inneren Uhr verbunden sind (Abbildung 4, rot gestrichelte Linie). Diese neu entdeckten, lichtempfindlichen Sinneszellen auf der Netzhaut enthalten das Photopigment „Melanopsin“ (Provencio et al. 2000). Photopigmente sind lichtempfindliche Farbstoffe, die zunächst Licht absorbieren und anschließend eine Kaskade von chemischen Prozessen auslösen, die in einem elektrischen Signal enden. Der Großteil der sogenannten Ganglienzellen in der Retina befindet sich überwiegend am blinden Fleck. Der kleinere Anteil von Ganglienzellen ist jedoch direkt lichtempfindlich und auf der gesamten Netzhaut verteilt. Diese Ganglienzellen werden daher „photosensitive retinale Ganglienzellen“ – kurz „PRGC“ oder auch „ipRGC“ (ipRGC, engl. intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cell) genannt. Die Entdeckung, dass dieser Teil (0,63 - 0,75 %) (Hannibal et al. 2017) in der Netzhaut des menschlichen Auges direkt lichtempfindlich ist und das bisher beim Menschen unbekannte Photopigment Melanopsin enthält, welches besonders empfindlich auf Licht im blauen Bereich reagiert (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001; Berson et al. 2002; Enezi et al. 2011), führte in den folgenden Jahren auch zum Nachweis, dass über das Auge vermittelte nicht-visuelle Effekte Einflüsse auf die Physiologie, Gesundheit und kognitive Leistung haben (Viola et al. 2008; Stefani et al. 2010; Chellappa et al. 2013; Vandewalle et al. 2013). Ein Beispiel für die nicht-visuelle Wirkung von Licht ist die Unterdrückung des Hormons „Melatonin“. Melatonin entsteht in der Zirbeldrüse, dem Darm und der Netzhaut und wurde von Lerner et. al 1958 entdeckt (Lerner et al. 1960; Tosini et al. 2014). Melatonin ist ein wichtiges Hormon für die Regulierung vieler physiologischer Funktionen, wie die Auslösung von Müdigkeit und regenerativen Prozesse im Körper. Die Produktion von Melatonin beginnt am Abend und nimmt im Laufe der Nacht bis ca. drei Uhr morgens zu, es gibt maßgeblich den Takt unserer inneren Uhr vor (Tosini et al. 2014). Die Produktion von Melatonin wird durch Licht gehemmt (Lewy et al. 1980) wobei Brainard (Brainard et al. 2001) die

stärkste Melatoninsuppression (Melatoninunterdrückung) mit Licht bei einer Wellenlänge von 464 nm maß. Es wird heute davon ausgegangen, dass die maximale Lichtempfindlichkeit des Photopigments Melanopsin bei 480 nm liegt (Lucas et al. 2014b). Dessen maximale Sensitivität unterscheidet sich, wie Abbildung 5 zeigt, von der Sensitivität der Stäbchen und der drei Zapfenarten im Auge.

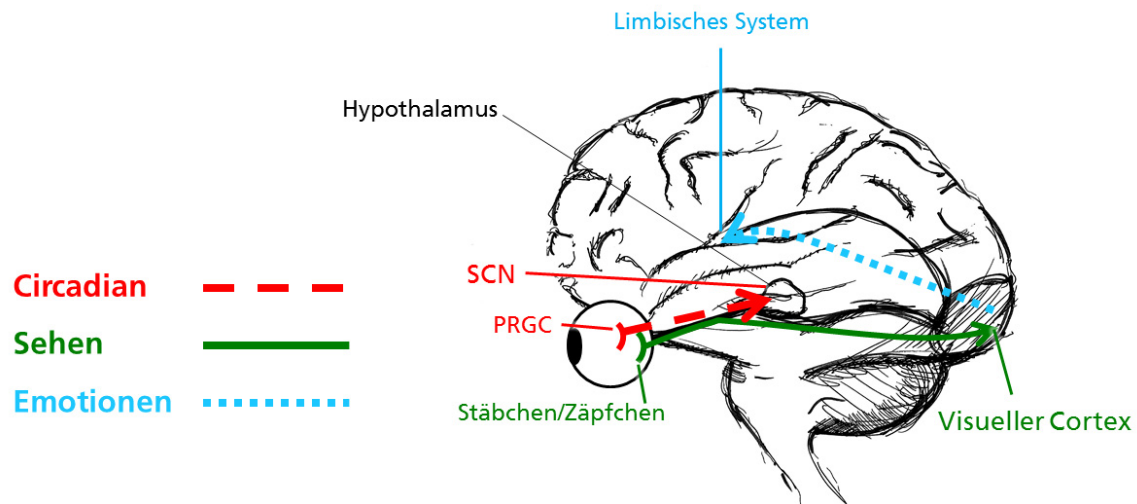


ABBILDUNG 4: LICHTWIRKUNGEN ÜBER DAS MENSCHLICHE AUGE

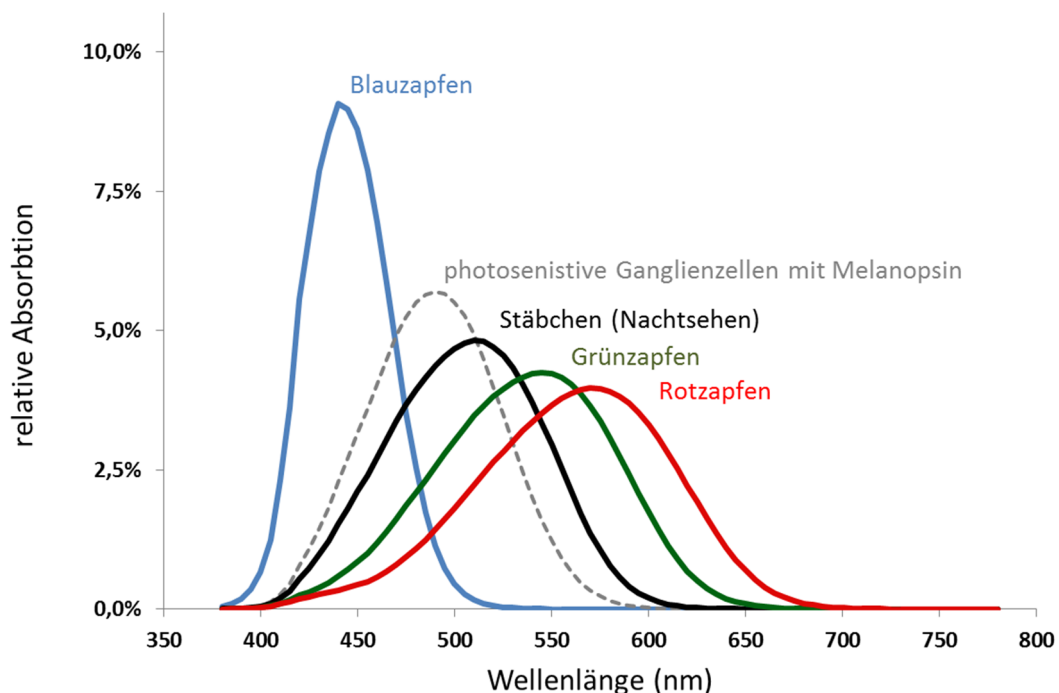


ABBILDUNG 5: SPEKTRALE EMPFINDLICHKEITEN DER REZEPTOREN IM AUGE. ALLE SPEKTREN SIND NORMIERT, UM EINE INTEGRIERTE FLÄCHE VON 100 % ZU GEBEN (MOD. NACH (LUCAS ET AL. 2014)). DIE ABSORPTIONSKURVEN BASIEREN AUF (GOVARDOVSKII ET AL. 2000).

Licht wirkt direkt auf die kognitiven Hirnfunktionen, selbst bei blinden Menschen (über Melanopsin in den ipRGCs): Bereits nach zwei Sekunden Exposition blauen Lichts (465nm) werden Hirnregionen, die für Aufmerksamkeit und Kognition verantwortlich sind (Präfrontaler Kortex und Thalamus) aktiviert (Vandewalle et al. 2013). IpRGCs haben möglicherweise Einfluss auf die Regulation weiterer Aspekte

der menschlichen Gehirnfunktionen, da in dieser Studie auch weitere Gehirnregionen angeregt wurden, z. B. der „anteriore cinguläre Cortex“ (zuständig für Blutdruck und Herzschlag sowie die rationale Entscheidungsfindung) sowie das „Pulvinar“ und der „Precuneus“. Die Funktionen dieser Gehirnregionen sind sehr komplex, sodass eine Erläuterung an dieser Stelle zu weit führen würde. Wie diese Photorezeptoren mit den eigentlichen Sehzellen (Zapfen und Stäbchen) interagieren ist noch nicht vollständig geklärt. Neue Forschungsergebnisse mit Mäusen deuten stark darauf hin, dass ipRGCs auch auf das Sehen wirken, indem sie Lichtsignale an die Netzhaut übertragen und so die Lichtanpassung der Retina beeinflussen (Prigge et al. 2016). Da es auf der Basis der Intensität und der spektralen Zusammensetzung einer Lichtquelle noch nicht möglich ist, vollständig vorherzusagen, welche Effekte die nicht-visuelle Wirkung von Licht auf den Menschen hat und welche Zusammenhänge dabei zwischen den einzelnen Photorezeptoren im Auge bestehen, schlagen Lucas et al. ein Verfahren zum Messen von Licht vor, welches die Bestrahlungsstärke für jeden einzelnen Photorezeptor im Auge berücksichtigt (Lucas et al. 2014a; Lucas et al. 2014b).

Wie eingangs erläutert, kann die Lichtwirkung auf den Menschen in drei Bereiche untergegliedert werden: Visuell, zirkadian und emotional. Das visuelle System und die Anforderungen an die Beleuchtung, die visuelle Leistung optimal zu unterstützen sind bereits weitestgehend bekannt. Das zirkadiane System dagegen ist Gegenstand der aktuellen Forschung der Chronobiologie. Die ausführlichen Zusammenhänge zwischen Licht und dessen Wirkung auf die menschliche Leistung zeigt Abbildung 6. Hier wird ebenfalls von drei grundlegenden Wirksystemen ausgegangen: Das zirkadiane System, das visuelle System und die „Motivation & Stimmung“.

Die ultradianen Lichtwechsel, welche in dieser Arbeit untersucht werden, lassen sich in Abbildung 6 überwiegend der „Motivation & Stimmung“ zuordnen. Die Anforderungen an das Sehen sowie die Erkenntnisse zur zirkadianen Wirkung werden bei der Gestaltung der Lichtszenarien berücksichtigt und in ihrer Wirkung nicht ausgeschlossen. Schwerpunktmäßig zielen aber die in dieser Arbeit untersuchten ultradianen Lichtwechsel auf die Unterstützung der menschlichen Leistung durch eine positive Stimmung ab, die, wie Abbildung 6 zeigt, über die „visuelle Nachricht“ einer optimierten Lichtbedingung erzeugt werden kann. Nach Boyce (Boyce 2014) kann man also den Wirkmechanismus der in dieser Arbeit getesteten Lichtszenarien überwiegend auf die erzeugte Stimmung eingrenzen. Folglich ist zu erwarten, dass die stimmungserzeugenden ultradianen Lichtwechsel dieser Arbeit emotional wahrgenommen werden und somit im limbischen System (Abbildung 4) verarbeitet werden.

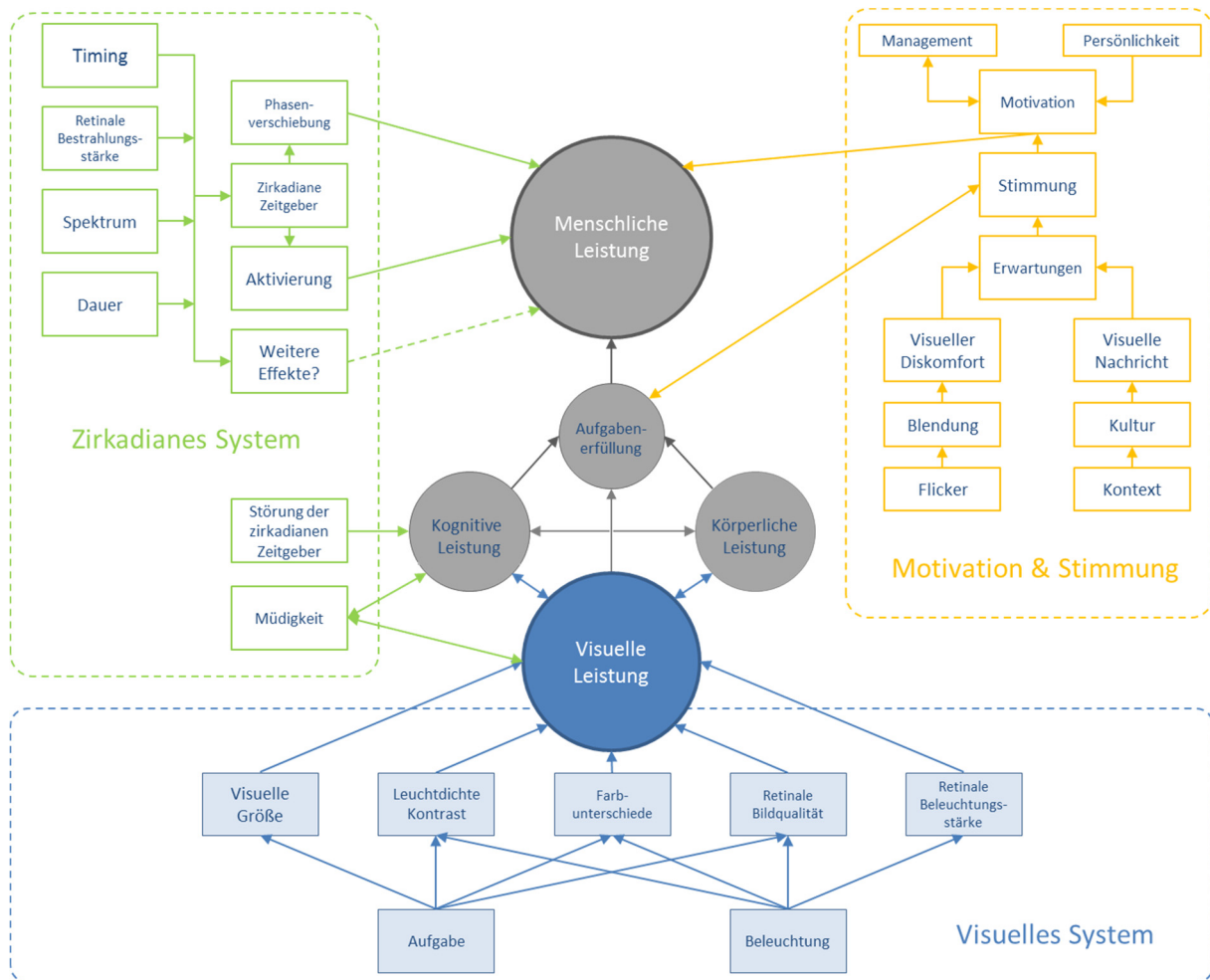


ABBILDUNG 6: LICHTWIRKUNGEN ÜBER DAS MENSCHLICHE AUGE (MOD NACH (BOYCE 2014))

2.6.1 Lichtwirkung auf Stimmung und Emotion

Aspekte zu Lichtwirkung auf Stimmung und Emotion müssen sehr differenziert betrachtet werden, damit man sich nicht in der Welt der Esoterik wiederfindet, sondern unangreifbare wissenschaftliche Begründungen zur Lichtwirkung ableiten kann. Die Schwierigkeit bei der Einbeziehung der emotionalen Komponente besteht in den fehlenden wissenschaftlichen Erkenntnissen und der teilweise gegenläufigen emotionalen und zirkadianen Wirkungen von Licht. Ein Beispiel hierfür ist folgende Diskrepanz: Biologisch gesehen wirkt Blau anregend und Rot trägt zur Müdigkeit bei, im Gegensatz zur Psyche, die von blauem Licht beruhigt und von rotem aktiviert wird (Birren 1950). Möglicherweise ist es diese Diskrepanz, welche Figueiro (Figueiro et al. 2009) feststellen ließ, dass nicht nur blaues Licht, sondern auch rotes Licht Wachheit in der Nacht induzieren kann. Der erhöhte Puls und der reduzierte Alpha-Frequenzbereich sowie der erhöhte Beta-Frequenzbereich im EEG war sowohl für rotes Licht mit einer Wellenlänge von 630 nm als auch für blaues Licht mit einer Wellenlänge von 470 nm gleich. Die Diskrepanz zwischen psychologischer und physiologischer Wirkung von warmen Farben könnte bei der Nachtschichtarbeit nützlich sein: Laut Faber Birren (Birren 1950) besitzt Orange einen sehr

anregenden Einfluss. Als nicht melanopisch wirksames Licht werden wegen der fehlenden Blauanteile in der Nacht orangefarbene LEDs empfohlen. Ob in der Nacht durch orangefarbiges Licht jedoch eine Aktivierung ohne Melatoninsuppression möglich ist, geht die aktuelle Forschung noch auf den Grund.

Eine Veröffentlichung aus dem Jahre 2012 nimmt das Ergebnis der Untersuchung schon vorweg: „Self-chosen Colored Light Induces Relaxation“. In einer Untersuchung wurden Auswirkungen von farbigem Licht auf Stimmung und Entspannung beurteilt (University of Groningen 2012). Wenn Licht entspannend wirken sollte wurde hauptsächlich blaues oder grünes Licht ausgewählt. Rote und pinke Farbtöne wurden zur Erregung ausgewählt. Der Ausschlag von Alpha-Wellen im EEG bei entspannend eingestelltem Licht war höher als bei Lichtfarben, die das Gegenteil bewirken sollten. Folglich waren die Probanden in der Lage, eine Bedingung zu schaffen, die sich bereits nach zweieinhalb Minuten positiv auf ihre Entspannung und Stimmung auswirkte. Dabei spielte der Farbton des Lichts nur eine untergeordnete Rolle. Entscheidend war das individuelle Gefallen der Lichtfarbe (University of Groningen 2012).

Um einen guten Schlaf zu ermöglichen, wurde von Sharp Japan ein sogenanntes "Sakura LED-Licht" auf den Markt gebracht. Bei dieser LED-Leuchte kann die Lichtfarbe von blauweiß auf „sakura“-rosa verstellt werden. Sharp empfiehlt dies für den Abend bzw. für die letzte Stunde vor dem Schlafengehen damit man schneller einschlafen kann und tiefer schläft. Es soll sogar besser als warmes Licht wirken. Eine Studie hierzu ist allerdings nur vom Hersteller selbst und in Japanisch verfügbar (Sharp Corporation 2012). In diesem Zusammenhang kann auch „Baker Miller Pink“ genannt werden, welches in Gefängnissen der USA und der Schweiz als Wandfarbe Verwendung findet, um aggressive Menschen zu beruhigen – in Deutschland wurde es wieder abgeschafft. Wissenschaftliche Studien hierzu zeigen widersprüchliche Ergebnisse bezüglich der beruhigenden Wirkung: Im Gegensatz zu Schauss (Schauss AG) finden James (Gilliam und Unruh 1988) keine blutdrucksenkende Effekte. Eine eigene Studie hierzu zeigte ebenfalls keine Effekte (Reithinger et al. 2017).

Die Wirkung unterschiedlicher Lichtverteilungen auf der Straße auf das wahrgenommene persönliche Sicherheitsempfinden wurde durch zwei experimentelle Studien nachgewiesen (Haans und Kort 2012). Beide Studien zeigen, dass Menschen Licht bevorzugen, welches in ihrer eigenen unmittelbaren Umgebung und nicht auf der Straße vor ihnen liegt. Ob Licht auch die Aggression und Vandalismus reduzieren kann, wird derzeit noch im Projekt „de-escalate“ in Eindhoven untersucht (<http://www.de-escalate.nl/>).

2.6.2 Lichtwirkung auf das Autonome Nervensystem (ANS)

In zahlreichen Studien wurde die Möglichkeit der Beeinflussung des autonomen Nervensystems (ANS), welches vom Menschen nicht willentlich gesteuerte Vorgänge im Körper - wie z. B. den Herzschlag - kontrolliert, durch Lichtveränderungen in Intensität und Spektrum, belegt (Edelhäuser et al. 2013). Veränderungen in der Aktivität des ANS lassen sich durch Analyse der Herzratenvariabilität (HRV) ermitteln. Die HRV gilt z. B. als Maß für Veränderung der Stimmungslage und des Stressniveaus (Camm 1996). Der gesunde Mensch reagiert auf Ereignisse in seiner Umgebung mit permanenter Anpassung der Herzfrequenz auf Herausforderungen. Ein weniger flexibleres Anpassungsvermögen gilt dagegen als Indikator für Krankheiten. Eine Veränderung der HRV mit der Änderung der Beleuchtung dient als ein Indikator für die Lichtwirkung auf den Menschen (Grote et al. 2013). Beispielsweise können Variationen von farbigem Licht mit der Frequenz von Blutdruckoszillationen (0,1 Hz) ebenfalls das ANS beeinflussen (Grote et al. 2013): Farbiges Licht, welches sich über einer Dauer von jeweils 10 s zwischen Rot, Grün und Blau veränderte, führte zu einer Verbesserung der Herzratenvariabilität. Die Ergebnisse dieser Studie implizieren positive Auswirkungen auf die Gesundheit durch dynamisches Licht, welches sich innerhalb von 10 s verändert (Grote et al. 2013). Die Eignung der Messung der HRV, um Lichtwirkungen auf den Menschen objektiv zu messen, wird dadurch ebenfalls belegt. Des Weiteren deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass möglicherweise auch andere ultradiane Lichtwechsel, wie z. B. beim natürlichen Wolkenspiel, die Stimmungslage verbessern könnten.

2.6.3 Lichtwirkung auf den zirkadianen Rhythmus

Im Auftrag der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) wurde eine umfangreiche Literaturstudie (>50 Veröffentlichungen, Zeitraum 1999-2009) durchgeführt, um die Beleuchtungssituation für Schichtarbeiter zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Veränderung des gesamten täglichen Lichteinflusses eine gezielte zirkadiane Umstellung erfolgen kann. „Zirkadianer Rhythmus“ ist ein Begriff aus der Chronobiologie und bezieht sich auf den ungefähr 24 Stunden langen biologischen Rhythmus des Menschen. Aschoff (Aschoff et al. 1981) zeigten, dass ein wichtiger Taktgeber für diesen Rhythmus der Hell-Dunkel-Zyklus ist. Wie auch bei anderen periodischen Vorgängen gibt es beim zirkadianen Rhythmus eine Phase und Amplitude. Trotz Synchronisation der inneren Uhr mit dem Hell-Dunkel-Rhythmus gibt es beim Menschen interindividuelle, in der Bevölkerung normalverteilte, Unterschiede der tageszeitlichen Lage dieser Phase. Die Ausprägung wird als „Chronotyp“ bezeichnet. Stark ausgeprägte Chronotypen sind beispielsweise die sogenannten „Lerchen“ (Frühaufsteher) (Roenneberg et al. 2013). Neben der Lichtexposition wird der Chronotyp auch von den Genen, dem Geschlecht (Frauen sind im Gegensatz zu Männer eher Frühaufsteher) und dem Alter beeinflusst (Wulff et al. 2009). Mit 20 bis 25 Jahren sind wir eher Spätaufsteher, mit zunehmendem Alter werden wir Frühaufsteher. Ab einem Lebensalter von

20 Jahren müssten Männer 5-10 Jahre älter sein als Frauen, um dem gleichen Chronotyp zu entsprechen. Ab einem Alter von 55 Jahren kehrt sich der Effekt um: Männer stehen früher auf als Frauen (Roenneberg 2004; Foster und Roenneberg 2008; Wulff et al. 2009).

Niedrige Beleuchtungsstärken unter 15 lx am Auge in der Nacht verursachen kaum eine Phasenverschiebung des zirkadianen Rhythmus aber bereits ab 100 lx tritt eine Phasenverschiebung von 1,8 Stunden auf. D.h. auch der Schlaf-Wach-Rhythmus wird dabei um 1,8 Stunden verschoben, man schläft sozusagen bei 100 lx erst knapp zwei Stunden später ein. Ab ca. 500 lx sind 90% der maximalen Phasenverschiebung von 3,2 Stunden (bei 9100 lx) erreicht (Zeitzer et al. 2000). Die Richtung und Stärke der Phasenverschiebung hängt vom Zeitpunkt der Bestrahlung mit Licht ab: Wird ein Lichtreiz vor dem Einschlafen gegeben tritt eine Phasenverzögerung ein (d.h. späteres Einschlafen und späteres Aufstehen). Wird ein Lichtreiz nach dem Aufstehen gegeben tritt eine Phasenbeschleunigung ein (d.h. früheres Einschlafen und früheres Aufstehen) (Khalsa, S. B. S. et al. 2003).

Eine Phasenverschiebung stellt einen Eingriff in den Organismus dar, der zu gesundheitlichen Problemen führen kann. D.h. die falsche Dosierung von Licht kann je nach Tageszeit den biologischen Rhythmus verschieben. Zu viel Licht vor dem Schlafengehen würde z. B. das Einschlafen verzögern. Bei Schichtarbeit mit kurzen Schichtwechseln ist eine Anpassung des Rhythmus nicht sinnvoll (Vandahl 2009), da sich der Mensch sonst ständig an die neue Schicht wie an eine neue Zeitzone gewöhnen müsste, das lohnt sich sozusagen nicht. In Kapitel 2.7.5 wird gezeigt, dass auch stark wechselnde Beleuchtung Effekte auf die Verschiebung der zirkadianen Rhythmik verursacht.

Diese Forschungsergebnisse zeigen, dass Licht einen großen Einfluss auf den zirkadianen Rhythmus des Menschen und seine Gesundheit hat. Licht ist der wichtigste Taktgeber für den zirkadianen Rhythmus des Menschen.

Chellappa et al. (Chellappa et al. 2013) untersuchten die Wirkung von kaltweißem Kompaktleuchtstofflicht auf die Schlafqualität. Nach einer Vorbereitungszeit blieben 30 Probanden zwei Stunden unter der jeweiligen Beleuchtung und gingen dann nach 45 Minuten Dimmlicht mit 40 Lux am Auge zu Bett. Kaltes Licht (6500 K) am Abend beeinflusste den Non-REM-Schlaf negativ, warmes Licht (2500 K und 3000 K) dagegen hatte keinen Einfluss. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits geringe Helligkeiten von kaltweißem Kompaktleuchtstofflicht die Einschlafphase verschlechtern. Im Experiment sind die Probanden dem kaltweißen Licht um 21:30 Uhr ausgesetzt worden. Einschlafstörungen wurden ab 0:15 Uhr gemessen. Um tagsüber wach und produktiv zu sein, ist gesunder und ausreichender Schlaf jedoch wichtig. Eine amerikanische Studie mit 4188 Angestellten hat gezeigt, dass der durchschnittliche Produktivitätsverlust bei Schlaflosigkeit 6,1 % war. Die

Beeinträchtigung der Faktoren Aufmerksamkeit, Entscheidungsfähigkeit, Merkfähigkeit und Motivation lag zwischen 40 % und 100 % (Rosekind et al. 2010).

2.6.4 Lichtwirkung auf die Gesundheit

Die positiven Auswirkungen von „Vollspektrum“-Licht mit UV-Anteilen auf die Gesundheit in Grundschulen zeigte sich durch die geringere Zahl an Fehltagen im Vergleich zu der mit anderen Beleuchtungsarten (Hathaway 1995). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei „Vollspektrum“-Licht nicht um ein kontinuierliches Spektrum wie bei natürlichem Tageslicht handelte, sondern nur um ein „volleres“ Spektrum als bei einer herkömmlichen Leuchtstoffröhre mit Bandenspektrum (Abbildung 3). Oft zeichnen sich „Vollspektrumlampen“ nur dadurch aus, dass ihre Farbtemperatur höher als 5.000 K ist, ein UV-Anteil enthalten ist und die Farbwiedergabe besser als bei den meisten herkömmlichen Leuchtstofflampen ist. Diese positiven Effekte von „Vollspektrum“-Licht werden jedoch von Veitch et al. (Veitch und McColl 2001) kritisch betrachtet: Sie kritisieren vor allem die Art und Weise der Durchführung der Experimente, dass diese nicht deterministisch sind und gemessene Effekte nicht eindeutig auf den Lampentyp zurückzuführen sind.

Natürliches Tageslicht hat sich als vorteilhaft für Gesundheit und Produktivität erwiesen. Edwards et al. (Edwards und Torcellini 2002) haben in ihrer Literaturrecherche zusammengefasst, dass Tageslicht den Stress von Büroarbeitern reduziert, die Produktivität und Gesundheit verbessert und Studenten bessere Testergebnisse erzielen. Keep et al. (Keep et al. 1980) zeigten, dass Fenster in Krankenzimmern in kürzeren Aufenthaltsdauern resultieren. Tageslicht und Sicht durch Fenster fördert nicht nur die Gesundheit sondern auch das Wohlbefinden (Boyce et al. 2003).

2.6.5 Lichtwirkung auf Arbeitsleistung und kognitive Funktionen

Bereits eine Exposition von 50 Sekunden von blauem Licht mit einer Wellenlänge von 473 nm regt Gehirnregionen an, welche für Wahrnehmung, Erinnerung und Emotionen verantwortlich sind. Grünes (527 nm) und violette (430 nm) Licht hingegen verursachen eine wesentlich geringere Anregung. Eine nachhaltige Verbesserung der Gedächtnisleistung wurde bei 473 nm im Gegensatz zu 430 nm und 527 nm beobachtet (Vandewalle et al. 2007). Dies ist vermutlich auf die Sensitivität der ipRGCs zurückzuführen, da die Magnetresonanztomographie zeigte, dass blaues Licht Hirnregionen (präfrontal und Thalamus, verantwortlich für Wachheit und Kognition) selbst bei blinden Personen (bei denen die Ganglienzellen noch intakt sind) aktivieren (Vandewalle et al. 2013). Eine Untersuchung mit 94 Büroarbeitern während vier Wochen zeigte, dass unter blauangereichertem weißem Licht (17.000 K, 300-400 lx) während des Tages die subjektive Aufmerksamkeit, positive Stimmung, Produktivität und Konzentration signifikant höher waren als unter neutral weißem Licht (4000 K). Die Schlafqualität und –dauer während der Nacht wurden verbessert (Viola et al. 2008).

Der Einfluss einer reduzierten Menge an kurzwelligem (blauem) Licht an Büroarbeitsplätzen im Laufe der Nacht hinsichtlich zirkadianer Kenngrößen, Symptomen von Müdigkeit und Stimmungen wurde durch (Hoffmann et al. 2008) untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Licht (300 cd/m) mit reduziertem Blauanteil (1700 K) bei Nachtschichtarbeit die Melatoninausschüttung signifikant weniger beeinflusst als Licht mit 6300 K, ohne dabei die kognitiven Leistungsfähigkeiten der Testteilnehmer zu verringern. Es gab keine negative Veränderung der Befindlichkeit.

Als die Lockheed Corporation mit 2700 Mitarbeitern in ein neues Gebäude mit mehr Tageslicht umzog, reduzierte sich die Abwesenheit um 15 % während sich die Produktivität um 15 % erhöhte (Burke Miller Thayer). Nachdem VeriFone in Los Angeles in ein speziell dem Tageslicht gewidmeten Gebäude umzog, stieg die Produktivität um 5 % (Romm 1999).

2.6.6 Lichteinflüsse von Displays

Die Auswirkung von LED beleuchteten Bildschirmen auf die Müdigkeit wurde von Stefani et al. (Stefani et al. 2010) nachgewiesen. Probanden wurden zwei verschiedenen Bildschirmen ausgesetzt, während Messungen objektiver Indikatoren für Müdigkeit an ihnen durchgeführt wurden. Das EEG wurde kontinuierlich während des Experiments erfasst, um den Aufbau der Müdigkeit während des Wachseins zu quantifizieren. Das EOG (Elektrooculogramm - die Augenbewegungen) wurden mit zwei bipolaren Elektroden kontinuierlich abgeleitet. Die Häufigkeit der „Slow Eye Movements“ in der Augenbewegung ist ein Messwert, um die Müdigkeit objektiv zu beurteilen. Hormonelle Messgrößen wurden mittels Speichelproben alle 30 Minuten entnommen. Der Speichel diente zur Analyse des körpereigenen Hormons Melatonin. In einem Raum ohne äußere Einflüsse wurden Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungslicht konstant gehalten. Unter diesen Bedingungen wurden zwölf männliche Probanden zweimal für jeweils vier Stunden untersucht. Variiert wurde dabei nur der Blauanteil von zwei Bildschirmen (LED-beleuchtet: Bestrahlungsstärke $0,241 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$, Photonenfluss $2.1 \times 10^{13} \text{ Photonen}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ im Wellenlängenbereich von 454 bis 474 nm und herkömmlich beleuchtet: Bestrahlungsstärke $0,099 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$, Photonenfluss $0.7 \times 10^{13} \text{ Photonen}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ im Wellenlängenbereich von 454 bis 474 nm). Die beiden Bildschirme waren abgesehen vom Blauanteil identisch: 24 Zoll, 1900 x 1200 Pixel und $250 \text{ cd}/\text{m}^2$ Leuchtdichte. Bereits eine Woche vor der Studie mussten die Probanden ein „Aktimeter“ am Handgelenk tragen, welches Aktivitäts- und Ruhezeiten aufzeichnet. So konnte sichergestellt werden, dass die Teilnehmer regelmäßig zu Bett gingen und vor allem am Tag des Versuchs nicht übermüdet waren. Am Versuchstag selbst betraten die Probanden um 18:00 Uhr abends das Labor. Anschließend wurden folgende Vorbereitungen getroffen: Anbringen der physiologischen Messsensoren, kohlehydratarmes Abendessen, Fragebogen über den aktuellen Gesundheitszustand, Augenuntersuchung, etc. Um realistische Arbeitsbedingungen zu simulieren, mussten die Probanden immer wieder Aufmerksamkeitstests und Reaktionstests bewältigen. So

konnte auch festgestellt werden, ob sich die Leistungsfähigkeit zwischen den beiden Bedingungen unterschied.

Sowohl die subjektive Einschätzung als auch die objektiven Messungen der physiologischen Parameter zeigten deutliche Unterschiede bei der Müdigkeit. Die Gedächtnisleistung wurde ebenfalls beeinflusst. Bei einer Lernaufgabe, die aus 60 Wortpaaren mit semantisch verwandten Wörtern bestand, konnten sich die Probanden mit dem LED-Bildschirm an mehr Wortpaare erinnern als mit dem herkömmlichen Bildschirm (Cajochen et al. 2011). Die Slow Eye Movements traten beim LED-Bildschirm 30 Prozent seltener auf (d.h. 30 Prozent mehr »Wachheit«), die Reaktionszeiten nahmen um 8,5 Prozent ab und die innere Uhr wurde um 30 Minuten bis eine Stunde verschoben. D. h. beim Arbeiten am »blauen Monitor« erreichten die Probanden erst eine halbe Stunde später die Müdigkeitswerte der Kontrollgruppe, die am normalen Monitor arbeitete. Das ist am Abend natürlich nicht unbedingt erwünscht. Wood et al. (Wood et al. 2013) haben ähnliche Effekte bei der Benutzung von Tablet-PCs am Abend festgestellt und schlagen darum vor, am Abend die Helligkeit von Displays stark zu reduzieren.

Kapitel 2.5 macht deutlich, dass Licht in vielerlei Hinsicht sowohl physiologisch als auch psychologisch auf den Menschen wirkt und seine Leistungsbereitschaft beeinflussen kann. Vor allem die nicht-visuelle Wirkung findet in der aktuellen Forschung besondere Beachtung und sollte bei der Beleuchtungsplanung keinesfalls vernachlässigt werden. Daher soll Kapitel 2.6 Aufschluss darüber geben, wie die nicht-visuelle Wirkung bewertet werden kann. Viele der in Kapitel 2.5 dargestellten Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass natürliches Tageslicht einen positiven Einfluss auf uns hat. Darum soll in Kapitel 2.7 näher auf die Eigenschaften und Auswirkungen von natürlichem Licht eingegangen werden.

2.7 Bewertungsmethoden zur nicht-visuellen Lichtwirkung auf den Menschen

Um die spektrale Bewertung der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich zur Beurteilung nicht-visueller Lichtwirkungen festzustellen, wurde die DIN SPEC 5031-100:2015-08 erarbeitet (DIN SPEC 5031-100). Sie wird jedoch wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt noch nicht als Norm herausgegeben. In dieser DIN SPEC wird darauf hingewiesen, dass bei neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen die aufgeführten Wirkungsspektren an diese Erkenntnisse noch angepasst werden müssen. Die DIN SPEC 5031-100 liefert dennoch Anhaltspunkte, um die nicht-visuelle Wirkung von Licht formal zu bewerten.

Im Folgenden werden die Formeln zur Bewertung der visuellen und melanopisch bewerteten Strahlungsgrößen nach DIN SPEC 5031-100 gegenübergestellt (Formel 1, Formel 2):

FORMEL 1: VISUELL BEWERTETE STRAHLUNGSGRÖßE

$$X_{e,v} = \int_{380nm}^{780nm} X_{\lambda}(\lambda) * V(\lambda) * d\lambda$$

FORMEL 2: MELANOPISCH BEWERTETE STRAHLUNGSGRÖßE

$$X_{mel} = \int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) * s_{mel}(\lambda) * d\lambda$$

Dabei ist

X_{mel} Melanopisch bewertete Strahlungsgröße

$X_{\lambda}(\lambda)$ Spektrale strahlungsphysikalische Größe

$s_{mel}(\lambda)$ Wirkungsspektrum für die betrachtete melanopische Wirkung, bezogen auf den Maximalwert $s_{mel, max} = 1$,

λ_u, λ_o Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich, z. B. $\lambda_u = 380nm$ $\lambda_o = 780nm$

Da die DIN SPEC 5031-100 u.a. empfiehlt, die Ausstrahlcharakteristik einer Lichtquelle mit dem *melanopischen Wirkungsfaktor* oder der *melanopisch bewerteten tageslicht-äquivalenten Beleuchtungsstärke* zu beschreiben, soll darauf kurz eingegangen werden.

Der *melanopische Wirkungsfaktor* ist das Verhältnis der biologisch wirksamen Strahlungsgröße zur mit der Empfindlichkeit für Tagsehen bewerteten photometrisch wirksamen Strahlungsgröße nach Formel 3:

FORMEL 3: MELANOPISCHER WIRKUNGSFAKTOR

$$a_{mel,v} = \frac{\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) * s_{mel}(\lambda) * d\lambda}{\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} X_{\lambda}(\lambda) * V(\lambda) * d\lambda}$$

FORMEL 4: MELANOPISCHER WIRKUNGSFAKTOR

$$a_{mel,v} = \frac{X_{mel}}{X_{e,v}} * K_m$$

Dabei ist

$a_{mel, v}$	Melanopische Wirkungsfaktor (dimensionslose Größe)
K_m	Maximalwert Photometrisches Strahlungsäquivalent für Tagsehen = 683 lm/W
$V(\lambda)$	Spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagesehen nach DIN 5031-3

Beispielsweise haben Normlichtarten folgende melanopische Wirkungsfaktoren:

- Normlichtart A (Glühlampe, $T = 2856$ K) $a_{mel, v} = 0,376$
- Lichtart B (Sonnenlicht) $a_{mel, v} = 0,759$
- Normlichtart D65 $a_{mel, v} = 0,941$
- LED, weiß ($T = 4200$ K) $a_{mel, v} = 0,609$
- LED, weiß ($T = 6500$ K) $a_{mel, v} = 0,807$

Die melanopische tageslicht-äquivalente lichttechnische Größe $X_{v, mel, D65}$ ist das Produkt aus der melanopisch bewerteten Strahlungsgröße X_{mel} und dem melanopischen Tageslichtäquivalent $K_{mel, D65}$ berechnet mit Formel 5. Wenn zum Beispiel X_v für die Beleuchtungsstärke E_v steht, entspricht $X_{v, mel}$ der melanopischen Beleuchtungsstärke $E_{v, mel}$.

FORMEL 5: MELANOPISCHE TAGESLICHT-ÄQUIVALENTE LICHTTECHNISCHE GRÖßE

$$X_{v, mel, D65} = K_{mel, D65} * X_{mel}$$

FORMEL 6: MELANOPISCHE TAGESLICHT-ÄQUIVALENTE LICHTTECHNISCHE GRÖßE

$$X_{v, mel, D65} = \frac{K_{mel, D65}}{K_m} * a_{mel, v} * X_v = 1,103 * a_{mel, v} * X_v$$

Dabei ist

$X_{v, mel, D65}$	Melanopisch bewertete (tageslichtäquivalente) lichttechnische Größe
$K_{mel, D65}$	Melanopisches Tageslichtäquivalent = 753,86 lm/W

2.8 Eigenschaften und Auswirkung von natürlichem Licht auf den Menschen

Viele Menschen gehen einer Tätigkeit nach, die in Innenräumen stattfindet und verbringen daher den überwiegenden Teil eines Tages nicht unter freiem Himmel, sondern durchschnittlich 22,25 Stunden innerhalb von Gebäuden (Schweizer et al. 2007). Die Evolutionsbiologie zeigt aber, dass unser Sehapparat und unsere Wahrnehmung auf die natürlichen Lichtbedingungen angepasst sind (Ings 2008). Bei den Verkaufszahlen im Einzelhandel zeigt sich der Einfluss durch natürliches Tageslicht deutlich: Im Schnitt stiegen bei den 108 untersuchten Geschäften die Verkaufszahlen um 6 % - 40 % durch den Einsatz von Oberlichtern (Heschong 2003).

Die „Technischen Regeln für Arbeitsstätten“ (Fuchs und Weyde 2014) empfehlen, Arbeitsplätze mit möglichst ausreichend Tageslicht zu versorgen und erwähnen eine nicht näher spezifizierte, positive Auswirkung auf Gesundheit und Wohlbefinden des Menschen. Die Anforderung nach genügend Tageslicht wird erfüllt, wenn der Tageslichtquotient „D“ größer als 2 % ist (bei Dachoberlichtern > 4 %) (Formel 7).

FORMEL 7: TAGESLICHTQUOTIENT

$$D = \frac{E_p}{E_a} * 100 \%$$

Dabei ist

E_p Beleuchtungsstärke an einem Punkt im Innenraum

E_a Beleuchtungsstärke im Freien ohne Verbauung bei bedecktem Himmel

Kunstlicht entspricht in vielerlei Hinsicht nicht dem natürlichen Licht: Weder Intensität und Spektrum noch Dynamik des natürlichen Lichts werden mit Kunstlicht an Arbeitsplätzen im Innenraum realisiert. Die im folgenden dargestellten Eigenschaften von natürlichem Tageslicht werden hinsichtlich ihrer Wirkweise auf den Menschen analysiert und den Eigenschaften von künstlicher Beleuchtung gegenübergestellt.

2.8.1 Intensität

Natürliches Tageslicht hat am Tag eine ca. hundertfach höhere Intensität als die 500-Lux-Normbeleuchtung - in der Nacht ist es bis zu tausendfach niedriger. Zu wenig Licht am Tag und zu viel Licht in der Nacht destabilisiert unser zirkadianes System und kann zu Depressionen führen (Rosenthal et al. 1984; Rosenthal et al. 1985; Terman et al. 1995). Besonders ältere Menschen, die sich tagsüber in Umgebungen mit niedrigen Beleuchtungsstärken aufhalten, leiden unter einem gestörtem zirkadianem Rhythmus, was auch den Schlaf-Wach-Rhythmus beeinträchtigt (Mishima et al. 2001). Zu

wenig Licht am Tag über einen längeren Zeitraum macht uns auch besonders sensitiv für Licht in der Nacht, welches eine verstärkte Melatoninsuppression mit sich zieht (Hébert et al. 2002). Melatoninsuppression in der Nacht sollte vermieden werden, da sie einhergeht mit einem erhöhten Krebsrisiko (Stevens 2006; Blask 2009; Blask et al. 1997). Helles Licht kann auch akut die Aufmerksamkeit erhöhen (Cajochen et al. 2000; Zeitzer et al. 2000; Rüger et al. 2003; Gornicka 2008) und akut die kognitive Leistungsfähigkeit verbessern (Campbell und Dawson 1990; Badia et al. 1991; Lockley et al. 2006; Chellappa et al. 2011). Helle, künstliche Beleuchtung (2500 lx am Auge) für eine Stunde am Tag in den Wintermonaten in Finnland bewirkte eine Verminderung von depressiven Symptomen und negativem Stress sowie eine Steigerung der Vitalität (Partonen und Lönnqvist 2000). Gifford, Hine und Veitch (Gifford et al. 1997) führten 1997 eine Meta-Analyse über die Wirkung der Beleuchtungsstärke auf Leistung bei Büroarbeit durch und berichteten, dass es eine geringe Korrelation zwischen der Beleuchtungsstärke und der Leistung gab. Zu dieser Zeit war noch nicht klar, was der Mechanismus für diesen Effekt sein könnte. Eine bessere Leistung mit höherer Beleuchtungsstärke hängt allerdings von der Aufgabe ab. Das zeigen zwei Studien von Smith und Rea die bereits 1978 und 1982 durchgeführt wurden (Smith und Rea 1982, 1982; Smith und Rea 1978). Beim Korrekturlesen konnte mit höherer Beleuchtungsstärke eine bessere Leistung erzielt werden. Bei einem weiteren Versuch, bei dem das Verständnis des Textes abgeprüft wurde, konnte mit höherer Beleuchtungsstärke keine Leistungssteigerung festgestellt werden. In beiden Studien variierte die Beleuchtungsstärke in mehreren Stufen zwischen 10 lx und knapp 5000 lx. Ist die Aufgabe kreativ zu sein, wirkt eine hohe Beleuchtungsstärke der Kreativität sogar entgegen. Steidle und Werth (Steidle und Werth 2013) zeigten, dass eine hohe Beleuchtungsstärke (1500 lx) im Vergleich zu gedimmtem Licht (150 lx) für die Kreativität eher hinderlich ist. 2013 veröffentlichten F. Beute und Y. de Kort eine Zusammenstellung der die Gesundheit positiv beeinflussenden Parameter Natur und Tageslicht (Beute und de Kort, Y. A. W. 2014). Es zeigte sich, dass helles (Tages-) Licht Stress reduzieren kann. Die Abnahme des Stressniveaus erfolgte durch das kardiovaskuläre System, insbesondere durch eine Aktivierung des Parasympathikus und Verbesserung der Herzratenvariabilität. Demnach verbessern Beleuchtungsstärken über 1000 Lux und Sonnenschein durch erhöhte Serotoninproduktion die Stimmung. Unter Einfluss von hellem Licht steigen außerdem Lebensfreude und geistige Leistung sowie die Wachsamkeit. Krankenhauspatienten in hellen Räumen benötigen weniger Schmerzmittel und berichten bei der Entlassung von weniger Stress und Schmerzen.

2.8.2 Spektrum

Das Sonnenspektrum ist kontinuierlich und weist kaum Lücken auf. Es enthält am Tage einen hohen Blauanteil. Durch den höheren Blauanteil ist dieses auch biologisch anregend, indem es z. B. Melatonin unterdrückt (Brainard et al. 2001; Thapan et al. 2001). Gooley et al. zeigten, dass gleich zu Beginn einer

Behandlung mit Licht, Licht mit einer Wellenlänge von 555 nm genauso wirksam auf die Unterdrückung von Melatonin ist wie Licht mit einer Wellenlänge von 460 nm, was auf einen signifikanten Beitrag der drei Zapfen im Auge schließen lässt, da deren maximale Hellempfindung λ_{\max} bei 555 nm liegt. Erst mit zunehmender Dauer des Versuchs nahm im Vergleich zum 460 nm Licht die Reduzierung von Melatonin beim 555 nm Licht exponentiell wieder ab (Gooley et al. 2010). Diese Forschung deutet darauf hin, dass am Ende doch alle Spektralanteile des natürlichen Lichts einen Einfluss auf den Menschen haben. Kunstlicht unterscheidet sich aber von natürlichem Licht im Spektrum meist sehr deutlich. Am gebräuchlichsten sind Energiesparlampen, Glühbirnen und LEDs. Energiesparlampen und Leuchtstoffröhren haben prinzipbedingt ein Bandenspektrum mit Spitzen bei Blau, Grün und Gelb-Orange. Das Spektrum der Glühbirne hat zwar ein kontinuierliches Spektrum, dieses ist aber anders verteilt: sehr wenig Blauanteil, aber dafür sehr viel Rot und Infrarot. Weißes LED-Licht wird meist mit einem blauen Chip, welcher einen Phosphor anregt und sich damit mischt, erzeugt. Dadurch entsteht das typische LED-Spektrum mit einer Lücke bei Cyan. Die Spektren gebräuchlicher Leuchtmittel im Vergleich zu Tageslicht sind in Abbildung 3 dargestellt.

2.8.3 Polarisation

Direktes Sonnenlicht und Streulicht durch Wolken ist unpolarisiert. Das Licht eines blauen Himmels ist jedoch je nach Abstand und Richtung zur Sonne mehr oder weniger polarisiert. Der Mensch kann im Gegensatz zu z. B. Bienen polarisiertes Licht kaum wahrnehmen. Eine sehr schwache Wahrnehmung von Polarisation ist das sogenannte „Haidinger Büschel“. Das Haidinger-Büschel erscheint beim Anblick einer linear polarisierten Fläche in der Mitte des Gesichtsfeldes und hat dort eine Ausdehnung von ca. 3° . Man kann es nur sehr schwach, am besten auf einer sehr gleichmäßigen, blauen Fläche wie ein längliches Büschel 90° zur Polarisationsrichtung wahrnehmen. Die Gründe hierfür führen sehr weit in das Spezialgebiet der Ophthalmologie hinein und werden hier nicht weiter erläutert. Ein stärkerer Einfluss von polarisiertem Licht auf den Menschen ist noch nicht endgültig ausgeschlossen. Eine Studie von Brainard (Brainard et al. 2000) zeigte jedenfalls keinen Unterschied zwischen unpolarisiertem und polarisiertem Licht auf die Melatoninsuppression. Brainard schlägt jedoch vor, die möglichen Effekte von polarisiertem Licht genauer zu untersuchen.

2.8.4 Lichtverteilung

Eine weitere Eigenschaft des natürlichen Lichts ist seine großflächige Ausdehnung bei nicht verbauter Sicht auf den Himmel. Provencio et al. (Provencio et al. 2002) berichteten bereits im Januar 2002 in einem kurzen Beitrag (engl. „brief communication“) an das renommierte Naturwissenschaftsmagazin „Nature“, dass sich ein grob aufgelöstes Netz an photosensitiven Ganglienzellen über die Netzhaut von Mäusen erstreckt, welches die Aufgabe hat, Helligkeit zu detektieren. Später wird bei Primaten

genauer festgestellt, dass diese melanopsinhaltigen Ganglienzellen außer in der Fovea auch über die gesamte Netzhaut mit einer Dichte von 3-5 Zellen/mm² verteilt sind und ihre maximale Konzentration von 20-25 Zellen/mm² im Umfeld der Fovea haben (Hattar et al. 2002; Dacey et al. 2005). Da die melanopsinhaltigen Ganglienzellen im Auge großflächig über die Netzhaut verteilt sind, wird angenommen, dass die nicht-visuelle Wirkung von Licht am größten ist, wenn das Licht von einer großflächigen Quelle, wie bei einer indirekten Beleuchtung einer großen, hellen Fläche kommt. In der Natur kommt dieses Licht vom Himmel. Wird nur ein kleiner Bereich der Netzhaut ausgeleuchtet, wie das der Fall beim gerichteten Licht eines Spots ist, vermutet man eine schwächere nicht-visuelle Wirkung (Abbildung 7). Fleischer stellte jedoch in einer einjährigen Beobachtung fest, dass gerichtetes Licht eine stärkere subjektive Aktivierung bewirkt (Fleischer 2001), die nicht-visuelle Wirkung auf Melatoninunterdrückung wurde nicht gemessen. Glickman et al. (Glickman et al. 2003) zeigten, dass Licht von oben eine stärkere Wirkung auf die Melatoninunterdrückung aufweist als Licht von unten (Abbildung 8). Gleiches wurde bereits 1999 im Zusammenhang mit Lichttherapie von Lasko (Lasko et al. 1999) erkannt und ist höchstwahrscheinlich evolutionär darauf zu begründen, dass am Tage das Licht überwiegend von oben auf uns einwirkt. Ein weiterer Effekt, welcher aber weniger wichtig ist, da er beim zweiäugigen Sehen kompensiert wird, ist die stärkere Lichtwirkung bei der Beleuchtung der nasalen Retina als bei der Beleuchtung der schläfenseitigen Retina (Rüger et al. 2005). Für die Melatoninunterdrückung sind zwei Augen wirksamer als eines alleine (Wang et al. 1998).

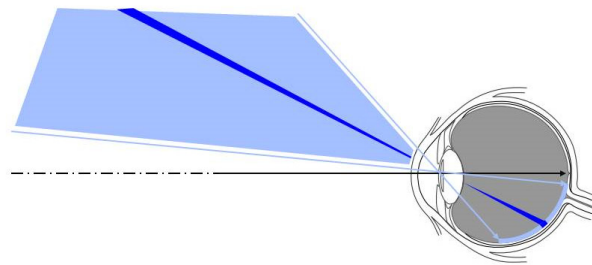


ABBILDUNG 7: FLÄCHIGES LICHT BELICHTET EINEN GRÖßEREN TEIL DER NETZHAUT ALS PUNKTFÖRMIGES UND BEWIRKT VERMUTLICH EINE STÄRKERE MELATONINSUPPRESSION

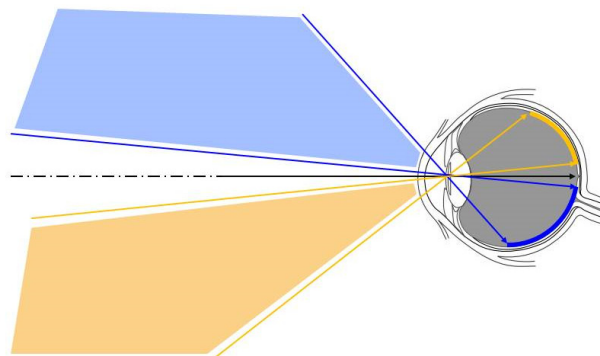


ABBILDUNG 8: LICHT VON OBEN BELICHTET DEN UNTEREN TEIL DER RETINA UND BEWIRKT EINE STÄRKERE MELATONINSUPPRESSION

2.8.5 Dynamik

Bei heutiger Bürobeleuchtung ist meist nur das manuelle Dimmen und der Wechsel zwischen direkter und indirekter Beleuchtung möglich, selten lässt sich auch die Farbtemperatur ändern. Unter natürlichen Bedingungen ändern sich aber die Lichtfarbe, Lichtrichtung und Intensität ständig. Dazu gehören auch schnelle wetterbedingte Lichtwechsel wie sie durch Wolken hervorgerufen werden können. Studien zu dynamischem Licht in Büroumgebungen haben gezeigt, dass bereits leichte Änderungen positive Auswirkungen auf das Wohlbefinden des Menschen haben: Die Motivation erhöht sich und die Akzeptanz des dynamischen Lichts ist generell sehr hoch (Dehoff 2002). Auswirkungen auf Wohlbefinden und Motivation durch das Ändern von Licht wurde auch von Fleischer (Fleischer 2001) untersucht. Die Beleuchtung bestand aus Leuchten, die langsam zwischen direktem und indirektem Licht wechselten. Das Verhältnis zwischen direkter und indirekter Beleuchtung wurde entsprechend der Tageszeit oder witterungsbedingt geändert. Es hat sich gezeigt, dass mit höherer Beleuchtungsstärke und einer großen indirekten Komponente die Freude steigt. Fleischer legt jedoch nahe, dass eine solche Beleuchtung nicht ausschließlich über den ganzen Tag angewendet werden sollte, sondern sich verändern sollte. Dynamische Beleuchtung kann auch das Lernverhalten in Schulen beeinflussen (Schulte-Marktwort 2010). Es konnte gezeigt werden, dass eine kalte Farbtemperatur die Konzentration steigert und eine warme Farbtemperatur eine entspannte Atmosphäre bietet. Die Farbtemperatur wurde von 5600 K auf 3000 K nach 25 Minuten gewechselt, die Beleuchtungsstärke wurde dabei ebenfalls von 1300 lx auf 600 lx verringert. Besonders während des Aufwachens am Morgen fördert dynamisches Licht, welches den Sonnenaufgang simuliert, Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Eine Studie, in der während des Aufwachens sowohl die Farbtemperatur (1090 K – 2750 K) wie auch die Beleuchtungsstärke am Auge (0 lx - 250 lx) geändert wurde, hat gezeigt, dass sich die Stimmungslage und das subjektive Wohlbefinden erhöht (Gabel et al. 2013), die kognitive Leistung verbessert (Gabel et al. 2015) und das Herz-Kreislauf-System entlastet wird (Viola et al. 2015) wenn ein Sonnenaufgang simuliert wird. Die Dämmerungssimulation kann auch wie ein Antidepressiva wirken (Terman und Terman 2006) und Schlafstörungen mindern (Terman et al. 1989).

In einer Langzeitstudie von drei Wochen pro Lichtszenario wurde dynamisches Licht im Vergleich zu statischem Licht bei Büroarbeitern untersucht. Die Beleuchtungsstärke wurde dabei zwischen 500 und 700 lx, die Farbtemperatur zwischen 3000 und 4700 K verändert. Die Dynamik war wie folgt gestaltet:

- 8:00 Uhr: 700 lx und 4700 K bis 12:00 Uhr gleichmäßig reduziert auf 500 lx und 3000 K
- 13:00 Uhr: 700 lx und 4700 K bis 16:00 Uhr gleichmäßig reduziert auf 500 lx und 3000 K

Bei der Untersuchung wurden keine positiven Effekte auf Schlaf, Vitalität, Kopfschmerzen und Produktivität von dynamischem Licht festgestellt. Die Mitarbeiter waren aber subjektiv zufriedener mit dem dynamischen Licht als mit dem statischen Licht (Kort und Smolders 2010).

Sehr stark wechselnde Beleuchtung zwischen Dunkelheit und Beleuchtungsstärken von knapp 10.000 lx haben im Verhältnis zu kontinuierlicher Beleuchtung stärkere Effekte auf die Verschiebung der zirkadianen Rhythmik, obwohl die integrierten Lux-Stunden bei kontinuierlicher Beleuchtung deutlich höher sind. Die integrierten Lux-Stunden waren bei der wechselnden Beleuchtung 77 % geringer als bei der Dauerbeleuchtung. Es hat sich gezeigt, dass 5,3 min Licht mit 9500 lx mit anschließender, 19,7 minütiger Dunkelheit über 5 Stunden nur 29 % weniger zirkadiane Verschiebung verursachte als bei kontinuierlicher Beleuchtung (zur Erläuterung der zirkadianen Phase, siehe Kapitel 2.5.2). Zu erwarten wären 77 % weniger Phasenverschiebung gewesen. Das deutet darauf hin, dass wir vermutlich bei Dunkelheit regenerieren und anschließend auf Helligkeit umso sensibler reagieren (Rimmer et al. 2000; Czeisler et al. 2001). Das könnte bedeuten, dass man z. B. für die Nachtschichtarbeit den Tag-Nacht-Rhythmus durch dynamisches Licht schneller verschieben könnte. Auch Rea (Rea 2002) vermutet, dass man eine wirksame Verschiebung der zirkadianen Phase durch dynamisches Licht erzielen könnte, ohne dass sich der Melatoninspiegel verändert. Er verweist auf eine Studie (Gronfier, Kronauer, Wright, Czeisler 2000) in der 6,5 Stunden dauerhaftes, helles Licht (9500 lx am Auge) den gleichen Effekt hat wie sechs Pulse von 15 Minuten Dauer mit einer stündlichen Folge und der gleichen Beleuchtungsstärke. Seine Ergebnisse zeigen, dass eine Phasenverschiebung auch bei niedriger Melatoninsuppression eintreten kann. Der mittlere Melatoninspiegel wurde während der 6,5 Stunden mit dem kontinuierlichen Lichtpuls von 9500 lx etwa um 90 % abgesenkt, während die unterbrochenen Pulse zu weniger als 20 % geführt haben. Möglicherweise lässt sich so auch eine aktivierende Wirkung von dynamischem Licht ohne Melatoninsuppression erreichen. Die oben genannten Beleuchtungsniveaus und starken Dynamiken lassen sich weder bei der Nachtschichtarbeit noch im Büro umsetzen. Trotzdem legen die dahinter liegenden Mechanismen die Vermutung nahe, dass sich auch tagsüber und bei abgeschwächter Dynamik eine Aktivierung durch Lichtwechsel erzielen lässt.

Eine rein psychologische Wirkung von schnellen dynamischen Lichtwechseln wurde von Smolders et al. (Smolders et al. 2012) untersucht. Sie untersuchten, ob bei gleicher mittlerer Lichtdosis (1000 lx am Auge) ein merkbar heller werdendes Licht, und ein merkbar dunkler werdendes Licht im Vergleich zu einem statischen Licht unterschiedliche Auswirkungen auf die subjektive Müdigkeit, das Wohlbefinden und die Aufmerksamkeit haben. Die subjektive Schläfrigkeit wurde mit der Karolinska Sleepiness scale (KSS) (Akerstedt und Gillberg 1990) gemessen. Vitalität und Anspannung wurden mit sechs ausgewählten Items aus der Activation-Deactivation checklist (Thayer 1991) bewertet. Zusätzlich wurden zwei Items zur Beurteilung der positiven und negativen Stimmung (glücklich und traurig) verwendet. Um die kognitive Leistungsfähigkeit zu bewerten, wurden zwei Aufgaben eingesetzt. Ein auditiver psychomotorischer Vigilanz Test (PVT) wurde verwendet, um die Aufmerksamkeit zu bewerten sowie eine auditive Go-NoGo Aufgabe, um Exekutivfunktionen und Hemmung zu messen.

Sie konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede feststellen. Einzig war eine leicht positive Emotion bei dunkler werdendem Licht auszumachen.

Leistungsbezogene, subjektive und physiologische Lichtwirkungen von hoch dynamischen Lichtszenarien für die Produktionsarbeit am Tage wurde 2013 von Canazei untersucht (Canazei 2013). Hierbei wurde während 10 Sekunden die Helligkeit zwischen 500 lx und 680 lx erhöht und eine weitere Lichtdynamik mit Helligkeitsvariation von 500 lx und 2000 lx während 30 Minuten gegenüber statischem Licht untersucht. Beide Dynamiken waren nicht wahrnehmbar. Es wurde zwar keine signifikante Veränderung der Produktivität gemessen, unter den beiden Dynamiken wurden jedoch folgende Lichtwirkungen erfasst: Zum einen erlebten die Probanden die 10 Sekunden Helligkeitsdynamik als weniger ermüdend, interessanter und anregender. Zum anderen ergaben sich physiologische Effekte in der Nacht, indem die schnelle Dynamik zu ruhigerem Schlaf führte im Vergleich zu statischem Licht. Die 30-minütige Helligkeitsdynamik wirkte während der Arbeit entspannend.

Bezüglich der zirkadianen Dynamik bemerkt Ehrenstein (Ehrenstein 2002), dass der Mensch während des Tages normalerweise ein erhöhtes Bedürfnis nach Licht hat. Während der Nacht besteht physiologische Lichtscheu beziehungsweise eine Bevorzugung warmen Lichts, wie es Kerzen und Glühlampen emittieren.

Hinweise auf eine Leistungsförderung durch Veränderungen in der Umgebung liefert auch die neurologische Forschung mit akustischen Stimuli. Eine Gehirnaktivität in diesem Zusammenhang ist die neuronale Antwort des Gehirns auf eine Reizveränderung in der Umgebung, wie z. B. bei sich verändernden Lichtverhältnissen. Aufgabenirrelevante Änderungen in einem gleichmäßigen Strom von sich wiederholenden Reizen evozieren eine besondere Gehirnaktivität, die „Mismatch-Negativity“ (MMN) (Näätänen et al. 1978). Diese Aktivität, ein sogenanntes „Event Related Potential“ (ERP) entsteht durch die Verletzung von Gesetzmäßigkeiten eines Stimulus (Näätänen et al. 2001). Dieser kognitive Prozess ist wichtig für die Anpassung auf eine Veränderung in der Umwelt. Ein abweichender Reiz, welcher nicht für die eigentliche Aufgabe relevant ist, kann die Leistung beim Stroop-Task (Stroop 1935), ein weitverbreitetes experimentelles Paradigma, um große Aufmerksamkeit zu erzeugen und zu testen, verbessern (Mager et al. 2009). Da diese Effekte mit auditiven Stimuli durchgeführt wurden, lässt sich annehmen, dass solche Effekte auch mit visuellen Stimuli, wie z. B. eine Veränderung des Umgebungslichts, erreicht werden können.

Die Vermutung, dass dynamisches Licht wichtig für den Menschen ist, kann auch aus den Erkenntnissen zur Musik (Wokoun 1968; Fox 1971; Lesiuk 2005; Lesiuk 2010) und leisen Geräuschen (Mehta et al. 2012) geschlussfolgert werden, welche die Produktivität respektive die Kreativität fördern. Stille

könnte man demnach mit statischem Licht vergleichen und Musik bzw. leise Geräusche mit dynamischem Licht.

2.9 Individuelle Erkenntnisse zum Nutzerverhalten

Das Fraunhofer IAO Pilotprojekt „LightWork“ (Pross et al. 2015) zeigte die Möglichkeit der LED-Beleuchtung im Hinblick auf dynamisches Licht in der Bürolandschaft auf. Hier wurden sechzehn Arbeitsplätze mit farbveränderlichen LED-Beleuchtungssystemen ausgerüstet. Die Anwender konnten Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur individuell einstellen. Über einen Zeitraum von zwei Jahren konnten Daten zur Lichtsteuerung gesammelt und ausgewertet werden. Die aufgezeichneten Betriebsdaten wurden hinsichtlich der Nutzung bei der täglichen Arbeit ausgewertet. Zusätzlich zur Aufzeichnung der tatsächlichen Nutzung wurden Mithilfe eines Fragebogens die selbst wahrgenommenen Präferenzen der Nutzer abgefragt.

Die von den Teilnehmern gewählte Farbtemperatur hängt von unterschiedlichen Faktoren wie Tages- oder Jahreszeit ab. Bei den Befragungen der Nutzer zeigte sich, dass im Sommer subjektiv kaltweißes Licht (einundzwanzig Personen) deutlich dem warmweißen Licht (zwölf Personen) vorgezogen wurde. Im Winter wurden das kaltweiße Licht von siebzehn Personen und das warmweiße Licht von sechzehn Personen bevorzugt. Das spiegelte sich auch in der Benutzung der einstellbaren Farbtemperatur wieder. Im Herbst und Winter wurde wärmeres Licht als im Frühling und Sommer eingesetzt. Betrachtet man die vom Nutzer gewählte Lichtfarbe über den Tag, ist am Morgen eine überwiegende Nutzung von kaltweißem Licht zu erkennen. Im Laufe des Tages verändert sich dies hin zu einer wärmeren Lichtfarbe (Abbildung 9).

In einer weiteren Nutzerstudie des Fraunhofer IAO mit über zweitausend Befragten stand speziell die wahrgenommene Qualität der bestehenden Bürobeleuchtung im Mittelpunkt (Fraunhofer IAO und Zumtobel Research 2014). Ein Ergebnis der Studie zeigt den Zusammenhang zwischen der Lichtfarbe und dem Wohlbefinden auf: Neutrales und warmes Licht wird mit höherer Zufriedenheit, mit besserer Lichtqualität und auch mit höherem Wohlbefinden bewertet.

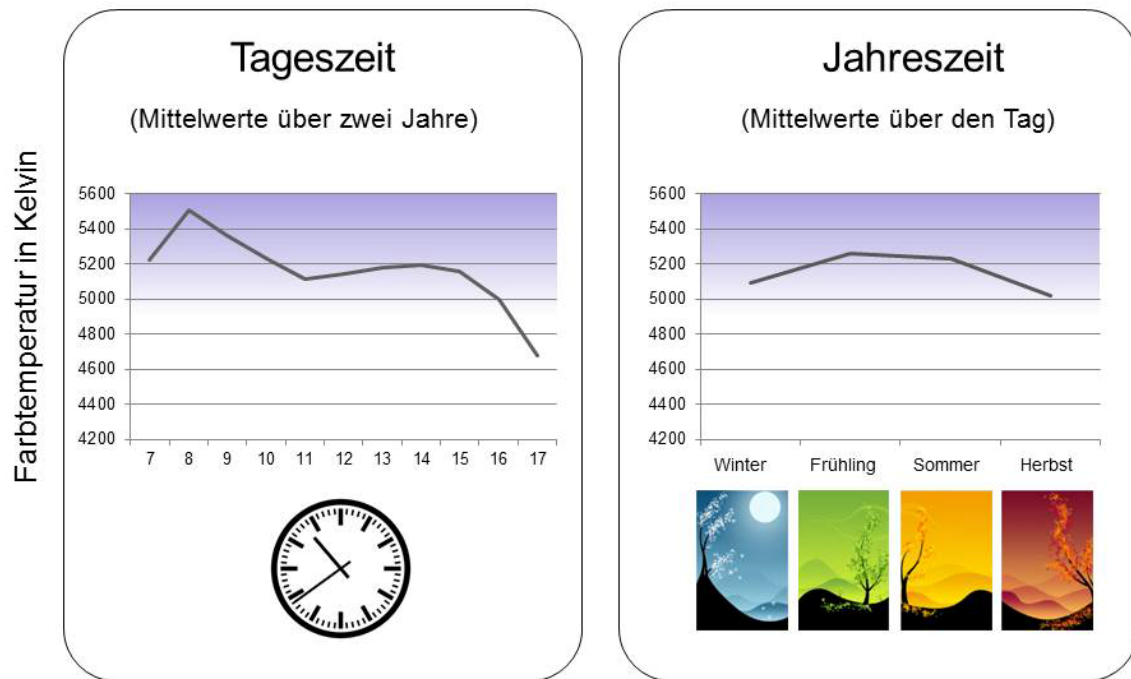


ABBILDUNG 9: NUTZUNG VON EINSTELLBARER FARBTEMPERATUR: GEMESSENE MITTELWERTE ÜBER ZWEI JAHRE

Weiterhin existieren auch kulturelle und individuelle Präferenzen bei der Farbtemperatur, wobei möglicherweise die geographische Breite eine Rolle spielt. Menschen aus kälteren Gebieten der Erde bevorzugen wärmeres Licht und umgekehrt (Benya und Schwartz 2003). Möglicherweise versucht man Kälte durch wärmeres Licht auszugleichen und Hitze durch kälteres Licht, da man einen ähnlichen Effekt auch bei der Raumtemperatur festgestellt hat (Nakamura 2013). Hajimu Nakamura zeigte: In einem Raum mit hoher Temperatur bevorzugt man hohe Farbtemperaturen (kaltes Licht) und in einem Raum mit niedriger Temperatur bevorzugt man niedrige Farbtemperaturen (warmes Licht).

2.10 Fazit zum Stand der Wissenschaft

In Kapitel 2.7 wurde aufgezeigt, dass viele Eigenschaften des natürlichen Lichts förderlich für die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistung des Menschen sind. Aus den Kapiteln 2.7.1, 2.7.2 und 2.7.4 ist z. B. zu folgern, dass eine Dynamisierung der Beleuchtung entsprechend der zirkadianen Rhythmik empfehlenswert ist. Offengeblieben sind die Fragen nach der Wirkung eines kontinuierlichen Spektrums, der Wirkung von polarisiertem Licht und der Wirkung von veränderlichen Lichtsituationen, insbesondere von ultradianen Lichtwechseln wie z. B. bei wetterbedingten Lichtwechseln.

Die nicht-visuelle Wirkung des Lichts findet bereits seit Anfang 2000 besondere Beachtung in der Forschung und wurde in vielfältiger Weise wissenschaftlich untersucht. Die emotionale oder psychologische Wirkung des Lichts findet in der Wissenschaft weniger Beachtung obwohl Boyce (Boyce 2014) den Einfluss auf die menschliche Leistung klar herausstellt (Abbildung 6).

Folgende Erkenntnisse motivieren diese Arbeit insbesondere:

- Wechselnde Beleuchtung hat im Verhältnis zu kontinuierlicher Beleuchtung stärkere Effekte auf die Verschiebung der zirkadianen Rhythmik, auch wenn die integrierten Lux-Stunden bei statischer Beleuchtung deutlich höher sind
- Neutrale und warme Farbtemperaturen werden in Europa einer Umfrage nach im Arbeitsumfeld subjektiv bevorzugt und sind dort auch überwiegend im Einsatz. Dies erschwert die Nutzung von blauangereichertem Licht und somit eine Aktivierung durch Licht bei der Arbeit.
- Die neuronalen Antworten des Gehirns auf eine nicht aufgabenrelevante Reizveränderung in der Umgebung können die Leistung verbessern
- Melatoninunterdrückung in der Nacht sollte wegen erhöhtem Krebsrisiko vermieden werden. Eine geringe Melatoninunterdrückung bei gleichzeitiger Aktivierung könnte durch dynamisches Licht erreicht werden

Bei der Wirkung von veränderlichen Lichtsituationen ergaben sich im Speziellen die folgenden offenen Fragen in der Wissenschaft: Studien zur Wirkung von dynamischen Lichtreizen sind überwiegend auf zirkadiane Rhythmen bezogen oder auf eine Änderung des Lichts entsprechend der Tätigkeit. Die Wirkung ultradianer, d.h. dynamischer Lichtrhythmen im Sekunden- und Minutenbereich sind bis auf die einzelnen genannten Studien heute kaum wissenschaftlich untersucht. Einige dieser Studien beziehen sich zudem auf extrem starke dynamische Lichtwechsel welche in der Nacht appliziert wurden und somit keine Antwort auf die Wirkung am Tag geben und in ihrer starken Ausprägung auch nicht praktikabel im Arbeitsumfeld anwendbar sind. Möglicherweise können aber ultradiane Lichtwechsel in schwächerer Ausprägung positive Effekte beim Menschen auslösen. Eine Vernachlässigung dieser Dynamiken könnte die Wahrscheinlichkeit von Befindlichkeitsstörungen und eingeschränkter Handlungsfähigkeit erhöhen (z. B. psychische Ermüdung).

Unter Berücksichtigung der Zielsetzung und der heutigen Erkenntnisse der Wissenschaft ergeben sich folgende Forschungsfragen zu ultradianen Lichtveränderungen:

- ➔ Finden ultradiane Lichtdynamiken bei der Wissensarbeit Akzeptanz? (Untersuchung 1)
- ➔ Welche Ausprägungen von ultradianen Lichtdynamiken werden bei der Wissensarbeit einer unveränderlichen statischen Lichtsituation vorgezogen? (Untersuchung 1)
- ➔ Lenkt ultradianes dynamisches Licht bei Arbeiten, die eine hohe Konzentration erfordern, ab? (Untersuchung 1)

- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektive Müdigkeit am Tage reduzieren? (Untersuchung 2)
- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektiven Befindlichkeiten verändern? (Untersuchung 2)
- ➔ Existieren unterschiedliche Effekte bezüglich der Art der Tätigkeit? (Untersuchung 2)
- ➔ Kann ultradiane dynamische Beleuchtung psychologisch aktivieren? (Untersuchung 2 und 3)
- ➔ Kann ultradiane zeitlich dynamische Beleuchtung die subjektiven Befindlichkeiten verändern? (Untersuchung 3)
- ➔ Kann ultradiane zeitlich dynamische Beleuchtung physiologisch aktivieren? (Untersuchung 3)
- ➔ Kann ultradiane zeitlich dynamische Beleuchtung die Konzentrationsleistung und die Kreativität verbessern? (Untersuchung 3)

Diese Forschungsfragen sollen durch die folgenden drei Untersuchungen beantwortet werden:

- Untersuchung 1: Akzeptanzuntersuchung (Kapitel 3)
- Untersuchung 2: Studie zur örtlichen Lichtdynamik (Kapitel 4)
- Untersuchung 3: Studie zur zeitlichen Lichtdynamik (Kapitel 5)

3. Akzeptanzuntersuchungen zu ultradianem Lichtwechsel

Ausgehend von der Hypothese, dass ultradiane Lichtdynamiken gegenüber statischer Beleuchtung bevorzugt werden, wird sowohl ein Experiment mit ultradianen Lichtwechseln als auch eine Befragung von Büroarbeitern durchgeführt. Ziel ist zum einen die Identifikation von Wünschen und Bedürfnissen von Endnutzern bezüglich des Kunstlichts bei der Wissensarbeit. Zum anderen wird im Vorfeld der Experimente im Rahmen einer Voruntersuchung die grundlegende Akzeptanz von Lichtwechseln überprüft.

Da es nach Stand der aktuellen Forschung noch nicht möglich ist, Aussagen darüber zu treffen, ob die Nachbildung des Wolkenspiels in der künstlichen Beleuchtung kognitive Funktionen stimulieren und möglicherweise die Arbeitsleistung erhöhen kann, wird dies im Rahmen einer Vorstudie untersucht. Gemäß der aufgestellten Hypothesen und Forschungsfragen ist eine Steigerung des Wohlbefindens zu erwarten, was empirisch zu validieren war.

Basierend auf der Frage, welche Ausprägungen von ultradianen Lichtdynamiken bevorzugt werden, werden die im Folgenden dargestellten Lichtwechsel in ihren Wirkungen untersucht. Die Variablen Lichtveränderungen sind hierbei Dauer, Lichtfarbe und Intensität, da sich diese Eigenschaften auch in der Natur verändern und von einer positiven Wirkung natürlichen Lichts ausgegangen wird. Folgende Varianten werden untersucht:

- Statisches Licht ähnlich der traditionellen künstlichen Raumbeleuchtung
- Langsame Dynamik: Zirkadiane Veränderung der Farbtemperatur über einen Zeitraum von 3 Stunden, ähnlich zur farblichen Änderung des natürlichen Tageslichts ohne Wolken
- Mittlere Dynamik: Farbtemperatur- und Intensitätswechsel jeweils mit einem Wechsel von warm-weißem Licht (statisch während einer Dauer von 7 bis 15 Minuten) zu gedimmtem kalt-weißem Licht (Dauer des Wechsels zwischen 4 und 40 Sekunden)
- Schnelle Dynamik mit sehr starkem Farbtemperatur- und Intensitätswechsel alle 2 bis 4 Minuten. Abwechselnd kalt-weißes Licht (Wolke) warm-weißes Licht (Sonne) ähnlich der Bedingung bei vorbeiziehenden Wolken an einem sonnigen Tag

Die Interviews zu den Bedürfnissen heutiger Bürobeleuchtung wurden mit 50 Büroangestellten in Stuttgart durchgeführt. Diese Interviews zeigen die Wünsche bezüglich zukünftiger Bürobeleuchtung und decken Schwachstellen von heutiger Bürobeleuchtung auf. Der Zuspruch von dynamischem Licht im Büro wird identifiziert. Beim Interview wurden offene Fragen sowohl zur Beleuchtung als auch zur Interaktion mit dieser gestellt. Es wurde ermittelt, ob in beiderlei Hinsicht Probleme vorhanden sind und welche Vorzüge beziehungsweise Wünsche bestehen. Von hoher Bedeutung war, während des Ausfüllens der Fragebögen auf den jeweiligen Angestellten individuell zu reagieren und einzugehen.

3.1 Eingesetzte Instrumente

3.1.1 VGZ Fragebogen: Online-Fragebogen zum augenblicklichen Befinden

Die Voruntersuchung wurde in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Neurowissenschaften und Lernen Ulm (ZNL) durchgeführt. Um das augenblickliche, subjektive Befinden abzufragen, gibt es zahlreiche validierte Methoden. Der VGZ-Fragebogen (Verfahren zur Erfassung des Gefühlszustandes) wurde von Feist und Stephan (Feist und Stephan 2007) zur Bewertung des momentanen Gefühlszustandes entwickelt. Er ermittelt emotionales Erleben sehr differenziert in fünf Dimensionen:

1. negatives Gefühl (gedrückt, unzufrieden, unwohl)
2. positives Gefühl (fröhlich, gut, glücklich)
3. Interesse (fasziniert, interessiert, desinteressiert)
4. Erregung (ruhig, nervös, unruhig)
5. Wachheit (müde, schläfrig, wach)

Die einzelnen Gefühlszustände werden jeweils auf einer Skala von „0 = gar nicht“ bis „4 = sehr“ zu vier verschiedenen Zeitpunkten bewertet. 12 Punkte bedeuten bei

1. ein sehr negatives Gefühl
2. ein sehr positives Gefühl
3. ein sehr hohes Interesse
4. ein sehr hohes Maß an Erregung
5. ein sehr wacher Zustand

Der VGZ wurde für den Vorversuch ausgewählt, da er auf dem etablierten MDBF (Steyer et al. 1997) basiert, bereits mehrfach vom ZNL angewendet wurde und eine effektive Online-Auswertung durch das ZNL ermöglichte.

3.1.2 Attention Network Test (ANT)

Der Attention Network Test (ANT) wurde auf der Grundlage der Arbeit von Posner und Peterson (Posner und Petersen 1990) entwickelt. Danach unterteilt sich die Aufmerksamkeit in drei verschiedene, auch anatomisch voneinander abgrenzbare Bereiche mit den Funktionen der Alarmierung (die Fähigkeit den Zustand der Wachsamkeit zu erreichen und beizubehalten), Orientierung (Abwendung von bisherigen sowie Selektion und Hinwendung zu neuen Reizen) und exekutive Steuerung (die willentliche Fokussierung bei Aufmerksamkeitskonflikten). Der ANT wurde zur Messung der Effektivität dieser drei Fähigkeiten bzw. neuronalen Netzwerke konzipiert. In dieser Studie wird eine Kurzversion des ANT eingesetzt. Der ANT wird jeweils vor und nach der Exposition einer Lichtbedingung durchgeführt.

3.2 Technische Spezifikationen des Lampenprototyps

Für die praktische Durchführung wird ein über dem Schreibtisch aufgehängtes LED-Beleuchtungspanel „Heliosity“ verwendet (Abbildung 10). Die zeitliche Variation von Lichtfarbe und -intensität mit Heliosity simulierten das Wolkenspiel. Anhaltspunkte zur subjektiven Präferenz bei der Beleuchtungsstärke gibt Krüger (Krüger 2007): Bei einer Variabilität der Beleuchtung von 200 lx bis 600 lx und einem Indirektanteil der Beleuchtung zwischen 0 % und 100 % werden höhere Beleuchtungsstärken und ein höherer Indirektanteil als angenehmer bewertet. Die Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch variierte im Dynamik-Modus zwischen 200 lx (nur kurzzeitig) und 500 lx. Da Weiß-LEDs nicht dem breitbandigen und spektral lückenlosen Tageslicht entsprechen, müssen verschiedenfarbige LEDs ausgewählt und in einer Leuchte integriert werden. In Heliosity sind sechs verschiedenfarbige LEDs im Einsatz, deren addierte Spektren dem Tageslichtspektrum nahekommen (Abbildung 11). Dadurch werden zum einen ein möglichst kontinuierliches Spektrum und zum anderen eine feine spektrale Durchstimmbarkeit ermöglicht. Die eingesetzten Dynamiken betreffen sowohl die

Farbtemperatur als auch die Helligkeiten, da sich diese Parameter auch beim natürlichen Licht verändern. Durch ein spektral fein aufgelöstes und gezielt veränderbares Spektrum ermöglicht Heliosity eine in weiten Grenzen unabhängig voneinander veränderbare Farbtemperatur und Helligkeit.

Heliosity war seinerzeit die einzige „Vollspektrumlampe“ auf LED-Basis. LEDs haben die Eigenschaft, aufgrund Ihrer hohen Leuchtdichte stark zu blenden. Daher wird beim Design von Heliosity auf ein Lichtleiterprinzip mit seitlicher Einkopplung und Auskopplung über die Oberfläche gesetzt. So können zum einen die sechs Farben homogen gemischt und zum anderen die LEDs entblendet werden. Die sechs LEDs werden mit DMX angesteuert.

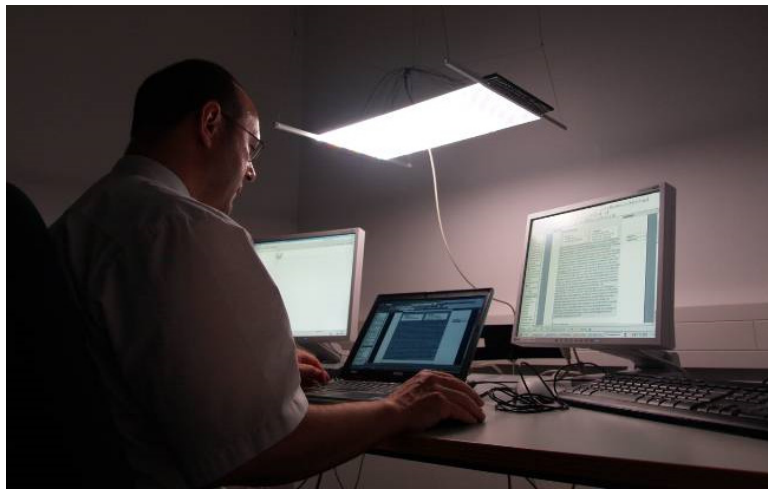


ABBILDUNG 10: VORVERSUCH ZU DYNAMISCHER BELEUCHTUNG MIT DEM BELEUCHTUNGSPANEL „HELIOSITY“

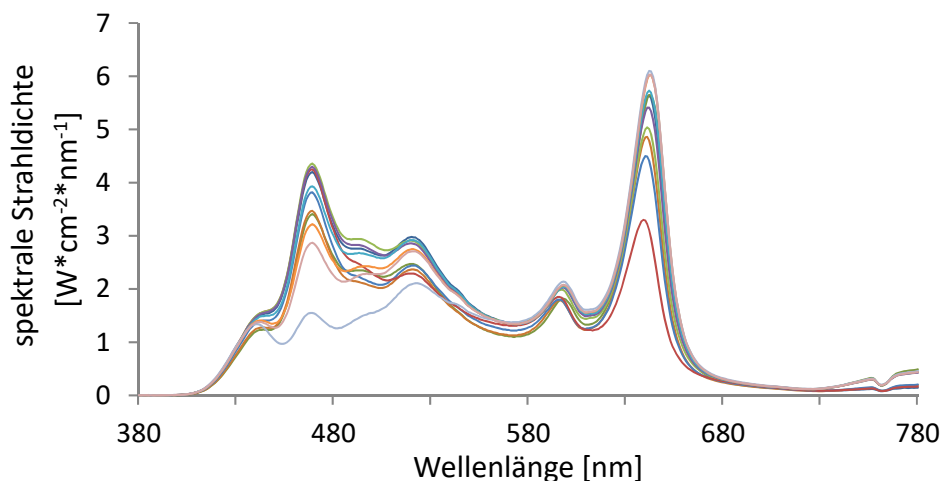


ABBILDUNG 11: SPEKTRALE STRAHLDICHTEVERTEILUNG UND VARIANZ DES SPEKTRUMS VON HELIOSITY BEIM VORVERSUCH

3.3 Methodik und Versuchsbedingung

Während der Dauer von fünf Wochen, mussten zehn Teilnehmer jede Woche einmal für drei Stunden eine der Lichtbedingungen während ihrer Arbeitszeit jeweils am gleichen Wochentag durchlaufen (Tabelle 3). Während dieser drei Stunden haben die Teilnehmer in einem abgedunkelten Einzelbüro mit Heliosity als Schreibtischbeleuchtung einen halben Arbeitsalltag verbracht. Während des Versuchs haben sie dreimal 45 Minuten mit ihrer individuellen Arbeit verbracht. Das Versuchsprotokoll ist in Tabelle 2 aufgelistet. Die Reihenfolge war bei allen Probanden gleich 1. Statisch (S), 2. langsame Dynamik (LD), 3. mittlere Dynamik (MD), 4. schnelle Dynamik (SD) (Tabelle 3). Die Licht-Präferenzen der zehn getesteten Personen bei der Wissensarbeit wurden jeweils am fünften und letzten Tag der Studie ermittelt. Die Probanden durften an diesem Tag ihre Lichtfarbe, d.h. die Farbtemperatur des Spektrums auf ein bevorzugtes Weiß selbst einstellen und auch aus den vordefinierten Lichtdynamiken frei wählen (Ind.). Am Ende wurde ein Interview mit jedem Teilnehmer mit Beschreibung zur Beurteilung des Lichts durchgeführt.

TABELLE 2: ABLAUF DES VORVERSUCHS ZUR AKZEPTANZ VON ULTRADIANEN LICHTDYNAMIKEN

1	Beginn	ANT
2	3 min	VGZ Online
3	7 min	45 min normal arbeiten
4	52 min	VGZ Online
5	56 min	45 min normal arbeiten
		Wiederholung 4-5
6	15 Minuten vor Ende	VGZ
7	Ende	ANT

TABELLE 3: LICHTBEDINGUNGEN UND VERSUCHSPERSONEN (VP)

		Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Woche 1	Vormittag	S, VP1	S, VP3	S, VP5	S, VP7	S, VP9
	Nachmittag	S, VP2	S, VP4	S, VP6	S, VP8	S., VP10
Woche 2	Vormittag	LD, VP1	LD, VP3	LD, VP5	LD, VP7	LD, VP9
	Nachmittag	LD, VP2	LD, VP4	LD, VP6	LD, VP8	LD, VP10
Woche 3	Vormittag	MD, VP1	MD, VP3	MD, VP5	MD, VP7	MD, VP9
	Nachmittag	MD, VP2	MD, VP4	MD, VP6	MD, VP8	MD, VP10
Woche 4	Vormittag	SD, VP1	SD, VP3	SD, VP5	SD, VP7	SD, VP9
	Nachmittag	SD, VP2	SD, VP4	SD, VP6	SD, VP8	SD, VP10
Woche 5	Vormittag	Ind., VP1	Ind., VP3	Ind., VP5	Ind., VP7	Ind., VP9
	Nachmittag	Ind., VP2	Ind., VP4	Ind., VP6	Ind., VP8	Ind., VP10

3.3 Verwendete statistische Methoden

Alle Daten aus den Untersuchungen dieser Arbeit (auch der nachfolgenden Untersuchungen 2 & 3) werden entweder direkt mit Excel, oder mit IBM SPSS Statistics Version 20.0 untersucht. Vor der Auswertung werden das Signifikanzniveau mit 5 % und tendenzielle Unterschiede bis 10 % festgelegt, da diese Niveaus gängige Praxis in den Sozialwissenschaften sind und die Wahrscheinlichkeit reduziert wird, dass ein zufälliger Unterschied für einen echten Unterschied gehalten wird (Sommer und Sommer 1991).

Die Ergebnisdiagramme in allen folgenden Abbildungen sind teilweise als Boxplots mit Median sowie 25. und 75. Perzentile dargestellt, wenn aufgrund von Ausreißern die arithmetischen Mittelwerte deutlich beeinflusst werden. Die Antennen kennzeichnen die maximalen und minimalen Messwerte außerhalb der Box. Die Ausreißer werden als Punkte eingezeichnet, sofern sie kleiner oder größer als das 1,5-fache des Interquartilsabstandes zwischen der 25. und 75. Perzentile sind.

Alle weiteren Diagramme stellen die arithmetischen Mittelwerte mit der empirischen Standardabweichung oder dem Standardfehler dar. Der Shapiro-Wilk-Test wurde benutzt, um zu testen, ob die jeweils ausgewerteten Stichproben normalverteilt sind, da er sich insbesondere bei der Überprüfung von kleineren Stichproben durch seine vergleichsweise hohe Teststärke auszeichnet (Bortz und Schuster 2010).

3.4 Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchungen

3.4.1 Fragebogen zum augenblicklichen Befinden (VGZ)

Die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) mit Messwiederholung ergibt zwischen den Lichtbedingungen keine signifikanten Unterschiede mit Ausnahme des nachlassenden Interesses nach dem ersten Versuchstag ($F_{(9, 105)} = 2,816$, $p = 0,005$) (Abbildung 12). Dieses erklärt sich durch den Versuchsplan: Beim ersten Termin sind alle Probanden noch interessiert. Mit zunehmender Versuchsdauer ist eine Tendenz von zunehmender Wachheit zu erkennen, jedoch nicht statistisch signifikant ($F_{(9, 105)} = 0,521$, $p = 0,857$). Die positiven Gefühle zeigen keinen Zusammenhang zur Lichtbedingung ($F_{(9, 105)} = 1,036$, $p = 0,416$). Bei den negativen Gefühlen gibt es ebenfalls keinen Zusammenhang zur Lichtbedingung ($F_{(9, 105)} = 0,491$, $p = 0,877$), ebenso wenig bei der Erregung ($F_{(9, 105)} = 0,31$, $p = 0,97$).

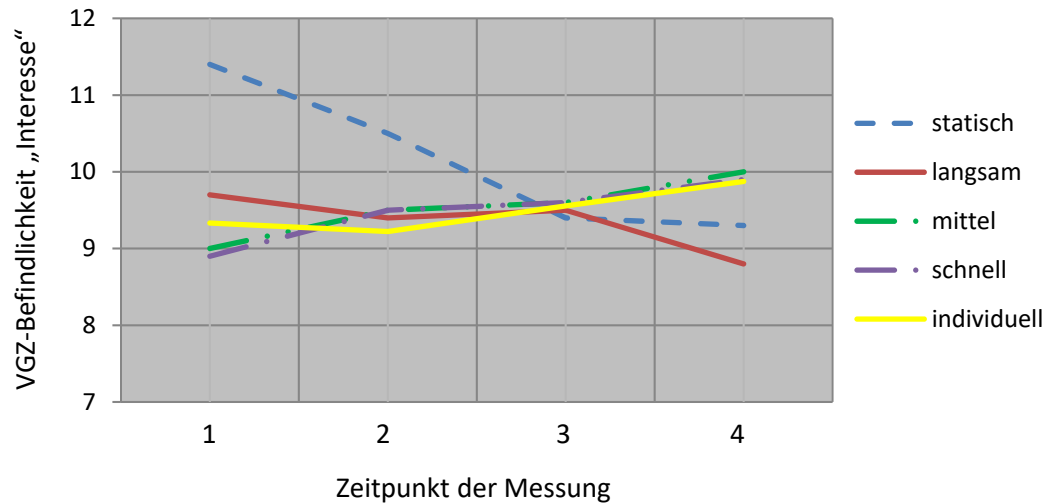


ABBILDUNG 12: DAS INTERESSE IST BEIM ERSTEN VERSUCH ZUM ERSTEN ZEITPUNKT AM HÖCHSTEN

3.4.2 Attention Network Test (ANT)

Bei jeder Lichtbedingung wurde die Aufmerksamkeit zu Beginn des Experiments und am Ende getestet. Hierbei ist bei keiner der Lichtbedingungen ein signifikanter Effekt auf die Aufmerksamkeit festzustellen, d.h. vor und nach dem Experiment haben die Probanden die gleiche Aufmerksamkeit. Zwischen den Lichtbedingungen sind ebenfalls keine Effekte zu verzeichnen. Bei der schnellen Dynamik ist eine (nichtsignifikante) Tendenz von weniger Fehlern nach der Lichtwirkung zu vermuten ($F_{(4, 45)} = 0,938$, $p = 0,45$). Die Fehlerrate sinkt hier jedoch auf das Standardniveau der anderen Lichtbedingungen.

Die Aufmerksamkeit zeigte bei den Funktionen „Alarmierung“ ($F_{(4, 45)} = 0,083$, $p = 0,987$), „Orientierung“ ($F_{(4, 45)} = 0,55$, $p = 0,699$) sowie „exekutive Steuerung“ ($F_{(4, 45)} = 0,971$, $p = 0,432$) ebenfalls keine Signifikanz.

3.4.3 Ergebnisse der offenen Fragen

Die Versuchspersonen wurden gebeten, die Wahl des angenehmsten Lichts zu begründen. Dabei zeigte sich, dass das Licht mit der schnellen Dynamik subjektiv belebend und anregend wirkte und die Versuchspersonen sich wacher gefühlt haben.

Schnelle Dynamik**Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?**

Dynamik ist belebend und nicht so monoton wie normalerweise am Büroarbeitsplatz (3x). Dynamik auf jeden Fall gut, sogar die schnellen Wechsel (2x). Das langsame Fading in ein anderes Licht hat mir gut gefallen. Die Lichtwechsel kommen nicht überraschend. Die Lichtwechsel haben mich animiert (2x). Die Änderung der Lichtsituation hat Spannungen gelöst. Das Licht hat mich wach gehalten / ich bin wacher geworden (2x). Die bemerkbare Dynamik hat mir gefallen. Bei konzentrierter Arbeit ist die dynamische Lichtsituation anregend. Ich habe mich gut gefühlt. Ich hatte das Gefühl das Licht und die Lichtwechsel sind sehr natürlich.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

Es gab zu viele Wechsel, die beim Arbeiten etwas stören, man könnte sich aber daran gewöhnen. Es gab zu viele drastische Übergänge, ich dachte die Lampe geht kaputt.

Fazit schnelle Dynamik:

Abgesehen von zwei negativen Bemerkungen zur Lichtsituation gab es überwiegend (16x) positive Antworten, eine anregende Wirkung wird dabei achtmal erwähnt. Eine Wolkensimulation mit sehr häufigen Lichtwechseln (alle 2 – 4 Minuten) sollten genauer auf ihre möglicherweise anregende Wirkung untersucht werden.

Mittlere Dynamik**Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?**

Man wacht auf. Eine Änderung alle 20 Minuten ist gut. Es gab nicht zu viele Änderungen. Die Abwechslung und die langsamen Übergänge haben mir gefallen. Es gab eine Abwechslung aber keine Ablenkung.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

Die Übergänge (das Fading) war zu schnell – die Dauer der Intervalle waren ok. Der Rhythmus war etwas komisch, hat mich rausgerissen.

Fazit mittlere Dynamik:

Die Aussagen der fünf positiven Bemerkungen im Vergleich zu den beiden negativen Bemerkungen legen nahe, dass eine Abwechslung in der Beleuchtung wünschenswert ist, man muss dabei jedoch auf den Rhythmus und das Fading achten.

Langsame Dynamik**Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?**

Die nicht zu bemerkende Dynamik hat mir gefallen. Die Blendung war geringer als bei statischer Beleuchtung.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

Das Licht wurde zu kalt und unangenehm. Ich hatte keine Lust zu arbeiten, wie an einem kalten Tag bei schlechtem Wetter.

Fazit langsame Dynamik:

Die positiven und negativen Eindrücke sind ausgewogen, wobei die negativen weniger die Dynamik sondern vielmehr die Lichtfarbe betreffen. Die Dynamik wurde kaum bemerkt.

Statisches Licht**Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?**

Keine Antworten

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

Licht war etwas grün. Ich konnte keinen Unterschied zur normalen Beleuchtung feststellen. Es hätte jedes beliebige Licht sein können. Es macht keinen Unterschied zu anderen Lichtern. Zu enger Lichtkegel. Zu dunkler Raum. In Kombination mit dem dunklen, ruhigen Raum war die Gesamtsituation etwas monoton.

Fazit statisches Licht:

Es gab ausschließlich negative Anmerkungen, die überwiegend auf die fehlenden Unterscheidungsmerkmale zur Standardbeleuchtung hindeuten. Die Antworten legen nahe, dass statisches Licht bereits ab drei Stunden monoton wirkt.

Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung zeigen, dass in den untersuchten Ausprägungen dynamisches Licht gegenüber statischem Licht bevorzugt wird. Befragt nach dem angenehmsten Licht nannte keiner der Teilnehmer das statische Licht. Von *7 Teilnehmern* wurde dagegen die schnelle Dynamik mit Farbtemperatur- und Intensitätswechsel alle 2 bis 4 Minuten als bevorzugtes Licht genannt. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in den offenen Antworten wieder: Die schnellste Dynamik findet mit 16 positiven Bemerkungen den besten Anklang (Abbildung 13). Das Licht war abwechselnd kalt-weiß (Wolke) und warm-weiß (Sonne). Von *zwei Teilnehmern* wurde die mittlere Dynamik mit Farbtemperatur- und Intensitätswechsel jeweils mit einem Wechsel von warm-weißen Vollspektrum (Dauer zwischen 7 und 15 Minuten) Licht zu gedimmten kalt-weißem Licht (Dauer zwischen 4 und 40 Sekunden) bevorzugt. Von *einem Teilnehmer* wurde die sehr langsame Dynamik, kohärent zur farblichen Änderung des natürlichen Tageslichts bevorzugt.

Auf die Frage nach dem unangenehmsten Licht nannte die Hälfte der Versuchspersonen das statische Licht. Kein Teilnehmer wählte das statische Licht als das angenehmste Licht. Möglicherweise war das Lichtspektrum des statischen Lichts den Versuchspersonen unangenehm und nicht so sehr die Statik des Lichts selbst. Im fünften Untersuchungsdurchgang konnten alle Versuchspersonen ihr eigenes Licht wählen, in dem sie eines der vier vordefinierten Szenarien noch einmal nutzten oder aber ihr eigenes, dann jedoch statisches, Licht einstellen konnten. Alle Versuchspersonen griffen auf eine der dynamischen Lichteinstellungen zurück. Dabei hätten die Versuchspersonen das Spektrum des statischen Lichts leicht ändern können. Sie konnten ihre Lichtfarbe, d. h. die Farbtemperatur des Spektrums auf ein bevorzugtes Weiß, selbst einstellen. Von einer Optimierung des statischen Lichts seitens der Probanden wurde jedoch abgesehen. Das spricht dafür, dass das statische Licht nicht wegen seines Spektrums, sondern wegen der fehlenden Dynamik abgelehnt wurde.

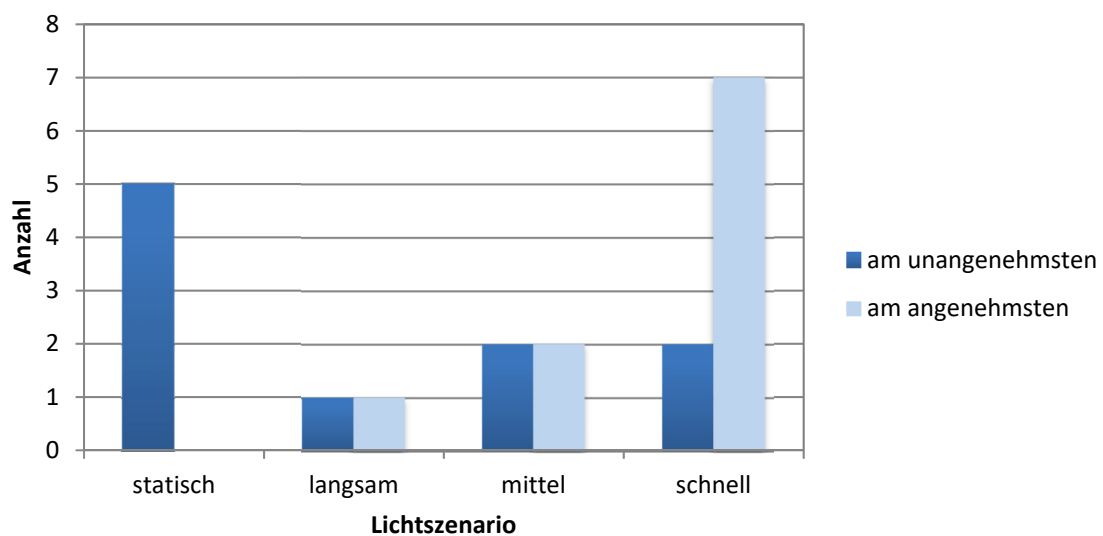


ABBILDUNG 13: SUBJEKTIV BEVORZUGTES LICHT

3.3 Schlussfolgerungen der Akzeptanzuntersuchungen

Die Vorstudie zeigt interindividuelle Unterschiede hinsichtlich der Präferenz von Licht. Das statische Licht, so wie es als konventionelles Kunstlicht Räume beleuchtet, war bei allen Versuchspersonen ähnlich unbeliebt. Dynamisches Licht wurde bevorzugt. In dieser ersten Studie konnte noch nicht geklärt werden, inwieweit die subjektiven Einschätzungen der Versuchspersonen sich in ihrem tatsächlichen Wohlbefinden oder sogar in ihrer Aufmerksamkeit und Konzentration widerspiegeln. Die Ergebnisse des ANT Konzentrationstests und des VGZ Fragebogens zum augenblicklichen Befinden zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen. Folglich lenken ultradiane Lichtveränderungen nicht von Tätigkeiten ab, die eine hohe Konzentration erfordern. Die Ergebnisse unterstützen weiterhin die Hypothese, dass durch die evolutionäre Anpassung des Menschen an natürliche Lichtrhythmen auch künstliche Raumbelichtung mit dynamischen Veränderungen positive

Auswirkungen auf das Befinden haben kann, da dynamisches Licht dem statischen Licht vorgezogen wurde. Möglicherweise wirkt sich dynamisches Licht nicht direkt auf die Konzentration aus, sondern wirkt erst bei längerer Dauer als drei Stunden der Müdigkeit bei Büroarbeit entgegen, da statisches Licht auch als monoton bezeichnet wurde. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde bei der Studie zur örtlichen Lichtdynamik über den Zeitraum eines ganzen Tages untersucht und die Schwerpunkte der Untersuchung auf die subjektive Müdigkeit und das momentane Befinden gelegt.

3.4 Ergebnisse von Probandeninterviews zu bevorzugten Lichtstimmungen

25 Frauen und 25 Männer in einem Alter zwischen 23 und 58 Jahren wurden zu bevorzugten Lichtstimmungen befragt. Die Auswertungen der Interviews zeigen, dass die meiste Arbeitszeit der Befragten am Schreibtisch verbracht wird, einen Großteil nimmt die Computerarbeit ein. Der Vergleich des Lichtbedürfnisses am Morgen und am Abend macht deutlich, dass die Befragten eine konkrete und weitestgehend übereinstimmende Vorstellung der Lichtgestaltung haben. Morgens steht bei hellerem Licht, welches diffus von der Decke abgestrahlt werden soll, die Aktivierung im Vordergrund. Reduzierte Helligkeit mit zusätzlichen Spots für direktes Licht, verbunden mit einer wärmeren Lichtstimmung wird für den Abend bevorzugt. Eine Zusammenstellung der Antworten gibt Abbildung 14 wieder. Aus Abbildung 15 wird deutlich, dass für konzentrierte Arbeiten eher statisches Licht, wie bei einem bedeckten aber hellen Mittagshimmel, bevorzugt wird. Bei kreativen Tätigkeiten wird eher dynamisches Licht, wie bei einem leicht bewölkten Himmel bevorzugt. Diese Ergebnisse unterstützen die Hypothese, dass je nach Art der Tätigkeit eine andere Lichtstimmung bevorzugt wird. Aus Abbildung 14 ist ersichtlich, dass zwar ein aktivierendes Licht wünschenswert ist, kaltes Licht aber nicht bevorzugt wird (im Fragebogen wurden Beispielbilder mit kaltem, neutralem und warmem Licht dargestellt). Die Vorliebe für neutrales und warmes Licht wurde bereits in Kapitel 2.3 mit den Ergebnissen von über 2000 Befragten erwähnt (Fraunhofer IAO und Zumtobel Research 2014). Nach dem heutigen Stand der Erkenntnisse zu aktivierendem Licht stehen also der Wunsch nach Aktivierung und die Abneigung gegen kaltes Licht im Widerspruch.

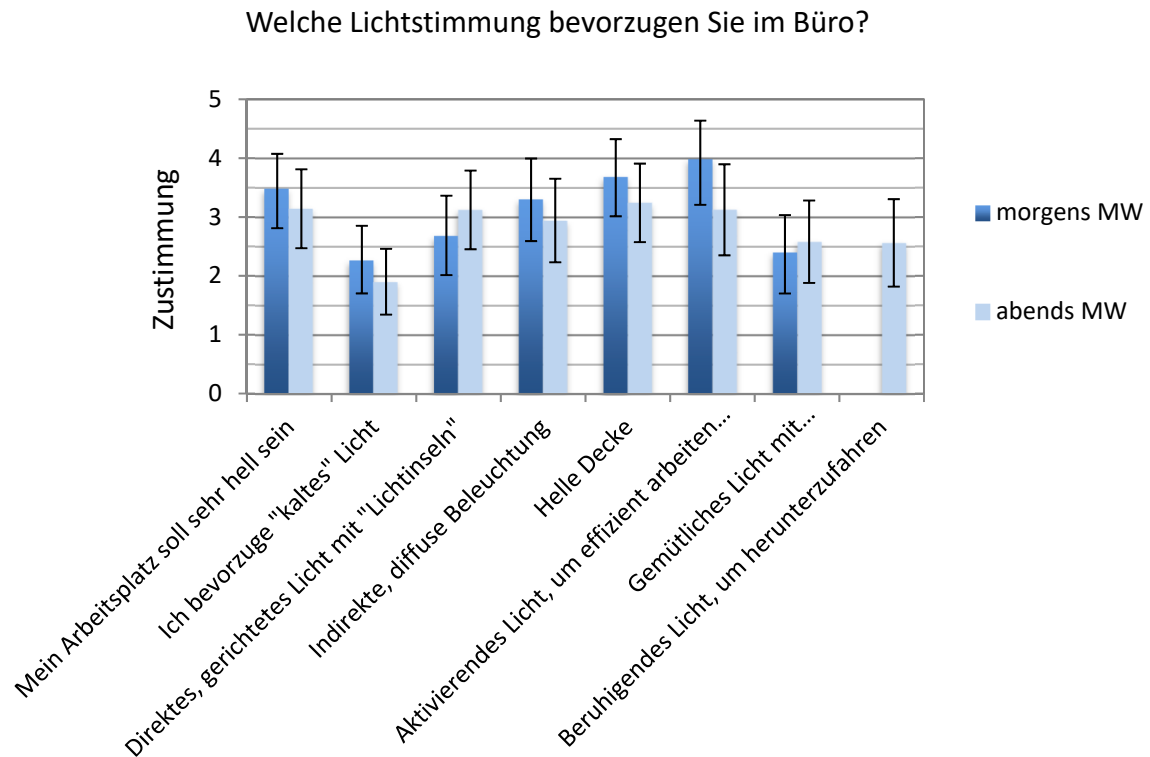


ABBILDUNG 14: BEVORZUGTE LICHTSTIMMUNGEN (1: TRIFFT ÜBERHAUPT NICHT ZU, 5: TRIFFT VÖLLIG ZU, N = 50)

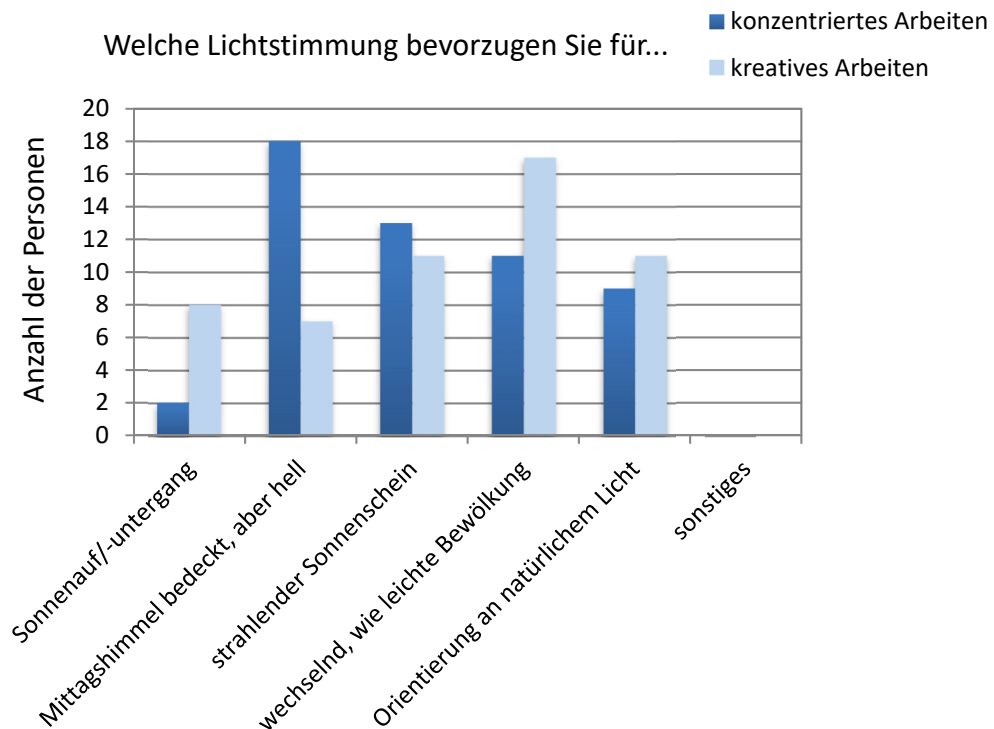


ABBILDUNG 15: BEVORZUGTE LICHTSTIMMUNGEN NACH ART DER TÄTIGKEIT (N = 50)

4. Die Wirkung ultradianer örtlich dynamischer Beleuchtung auf subjektives Befinden

Ausgehend von den Ergebnissen der Probandeninterviews und der Akzeptanzuntersuchungen sollte ein virtuelles Wolkenspiel mit zeitlicher und räumlicher Dynamik an der Raumdecke grundsätzlich nicht auf Abneigung stoßen, sondern hohe Akzeptanz finden, da die Simulation des Wolkenspiels in der Vorstudie (die schnelle Dynamik) die beliebteste Lichtbedingung war. Um die potenzielle Wirkung von dynamischem Licht zu verstärken, wird für die praktische Durchführung dieses Experiments der am Fraunhofer IAO entwickelte „Virtual-Sky“ eingesetzt (Stefani et al. 2012). Dabei handelt es sich um eine 34 m² große Lichtdecke, die sich wie ein Display ansteuern lässt und es ermöglicht, einen dynamischen Himmel mit ziehenden Wolken beliebiger Größe, Farbe und Form nachzubilden. In diesem Experiment wird der Einfluss der ultradianen örtlichen Dynamik von Licht auf die subjektive Müdigkeit und das subjektive Befinden ermittelt. Aus dieser Untersuchung sollen Erkenntnisse gewonnen werden, ob und wie dynamisches Licht bei der Büroarbeit eingesetzt werden kann und wo Optimierungspotential bei den Dynamiken besteht. Die Hypothese, dass ultradiane Lichtwechsel im Vergleich zu statischem Licht zu weniger Ermüdung und zur Verbesserung des subjektiven Wohlbefindens bei der Büroarbeit führen, wird überprüft.

Im Einzelnen werden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- ➔ Kann dynamische Beleuchtung die Müdigkeit am Tage reduzieren?
- ➔ Kann dynamische Beleuchtung das subjektive Wohlbefinden steigern?
- ➔ Bei welchen Tätigkeiten wird dynamische Beleuchtung bevorzugt?

4.1 Eingesetzte Instrumente

4.1.1 Eingangsfragebögen

Zunächst müssen die Probanden den Versuchsbedingungen und der anonymisierten Auswertung der Daten zustimmen und auf einem separaten Blatt die Einwilligungserklärung unterschreiben. Damit erklären sie ebenfalls, dass keine der Ausschlusskriterien (Krankheiten etc.) auf sie zutrifft. Um die Ergebnisse der Studie differenziert auswerten zu können, werden vor Beginn der Experimente Geschlecht, Alter, das Tragen einer Sehhilfe und die Müdigkeit vor Beginn des Experiments abgefragt.

4.1.2 Messung der subjektiven Müdigkeit

Die subjektive Müdigkeit kann nur durch den Teilnehmer selbst beurteilt werden. Zur Evaluation existieren verschiedene Fragebögen oder Beurteilungsskalen. Häufig verwendete Fragebögen sind

z. B. die Epworth Sleepiness Scale, die Stanford Sleepiness Scale und die Karolinska Sleepiness Scale (KSS) (Akerstedt und Gillberg 1990). Die KSS besteht aus 9 Ausprägungen von sehr wach bis sehr müde zum Ankreuzen (Abbildung 16). Die Kürze der KSS und ihre Validierung durch objektive Müdigkeitsmessungen mit dem EEG machen sie zum geeigneten Instrument dieser Untersuchungen und sie wird darum den anderen Verfahren vorgezogen.

Wie müde oder wach fühlen Sie sich in diesem Augenblick? (Bitte ankreuzen)

<input type="checkbox"/>	1	Sehr wach
<input type="checkbox"/>	2	
<input type="checkbox"/>	3	Wach
<input type="checkbox"/>	4	
<input type="checkbox"/>	5	Weder wach noch müde
<input type="checkbox"/>	6	
<input type="checkbox"/>	7	Müde, aber keine Probleme wach zu bleiben
<input type="checkbox"/>	8	
<input type="checkbox"/>	9	Sehr müde, große Probleme wach zu bleiben, mit dem Schlaf kämpfend

ABBILDUNG 16: DIE KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE (KSS)

4.1.3 Analoge Skala zum subjektiven Gefallen der Lichtszenarios

Um herauszufinden wie die Lichtszenarien den Probanden gefallen, sollen sie auf einer visuellen Analogskala (VAS) von 0 – *gefällt gar nicht* bis 100 – *gefällt sehr* ankreuzen, wie ihnen das Lichtszenario gefällt. Dieses Verfahren wird zur Messung von subjektiven Empfindungen verwendet (Rehberg 2006) (Abbildung 17). Trotz des Mehraufwandes durch die Ausmessung der exakten Position der Antwortmarkierung bei VAS Papierfragebögen im Vergleich zu Kategorienskalen wird sie für diese Untersuchung gewählt, da sie für kontinuierliche Variablen, wie hier das Gefallen, besser geeignet ist und schon geringste Unterschiede oder Veränderungen im Antwortverhalten gemessen werden können. Die Frage lautet: „Wie hat Ihnen das Licht heute gefallen? (Bitte auf Skala markieren)“



ABBILDUNG 17: VISUELLE ANALOGSKALA (VAS)

4.1.4 Fragebogen zur subjektiven Einschätzung der Befindlichkeit

Aus den Fragebögen zur Befindlichkeit wurde die Kurzform des häufig im deutschsprachigen Raum verwendeten BFS (Befindlichkeitsskala) Fragebogen ausgewählt (Abele-Brehm und Brehm 1986). Im Gegensatz zum VGZ, mit welchem bei der Voruntersuchung keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen festgestellt wurden, verwendet der BFS zwar ähnliche Dimensionen von Befindlichkeiten, jedoch nicht nur fünf, sondern insgesamt acht. Somit können die Befindlichkeiten

noch differenzierter betrachtet werden und Differenzen zwischen den Lichtbedingungen deutlicher sichtbar gemacht werden. Die Befindlichkeitsskalen verwenden die Dimensionen „aktiviert“ (frisch, angeregt, etc.), „Energierlosigkeit“ (abgeschlafft, energielos, etc.), „gehobene Stimmung“ (ausgezeichnet, angenehm, etc.), „Ruhe“ (entspannt, ruhig, etc.), „Ärger“ (sauer, zornig, etc.), „Erregtheit“, „deprimiert“ und „Besinnlichkeit“ (Besinnlichkeit wurde nicht verwendet). Die Skala ist wie beim VGZ fünfstufig und reicht hier von 1 bis 5 (nicht zutreffend – stark zutreffend).

Neben den oben genannten validierten Standardfragebögen eröffnen offene Fragen die Möglichkeit, weitere Einblicke in die Lichtwirkung auf die Probanden zu identifizieren sowie Verbesserungsvorschläge aufzunehmen. Aus diesem Grunde werden am Ende der Versuchstage den Probanden zusätzlich offene Fragen gestellt.

4.2 Versuchsanordnung

Der Versuchsraum ist so eingerichtet, dass die Hälfte der Probanden durch eine Trennwand vom natürlichen Tageslicht weitestgehend abgeschottet ist. Die andere Hälfte sitzt neben einer Fensterreihe mit heruntergelassener Jalousie. Da die vollständige Abschottung von Tageslicht in deutschen Büros unüblich und die Einrichtung fensternaher Arbeitsplätze zu bevorzugen ist (Fuchs und Weyde 2014), entspricht die Bedingung an der Fensterseite einer realen Büroumgebung. Der Tageslichtquotient beträgt an der Fensterreihe $D = 2\% - 4\%$ und an der Wand $D < 0,5\%$. Es sollte dabei beachtet werden, dass der Tageslichtquotient in seiner Aussagekraft begrenzt ist, da er teilweise Schwächen aufweist, wie z. B. die Vernachlässigung der Gebäudeorientierung und die Blendung durch direktes Tageslicht (Boyce 2014).

Die horizontale Beleuchtungsstärke direkt am Fenstersims bei heruntergelassener Jalousie mit horizontal gestellten Lamellen war überwiegend konstant (Abbildung 19). Da die Beleuchtungsstärke im Quadrat zum Abstand abnimmt, hat die sich durch das Tageslicht minimal verändernde Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtischmittelpunkt in ca. 2 m Entfernung zum Fenster keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Am letzten Tag des Versuchs war aufgrund des starken Windes die Jalousie am Morgen kurzfristig offen (Abbildung 19).

Die Raumtemperatur wurde während der gesamten Versuchsdauer konstant gehalten und ist nur jeweils zum Abend hin leicht angestiegen (Abbildung 20).

Sitzplan



Blick vom Eingang

Draufsicht

Wandseite

Fensterseite

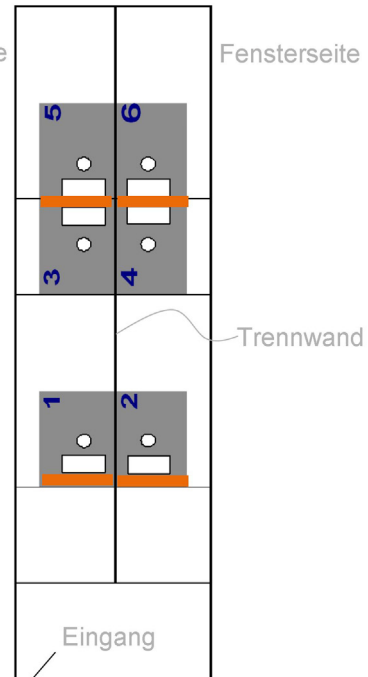


ABBILDUNG 18: VERSUCHSANORDNUNG BEI DER VIRTUAL-SKY STUDIE

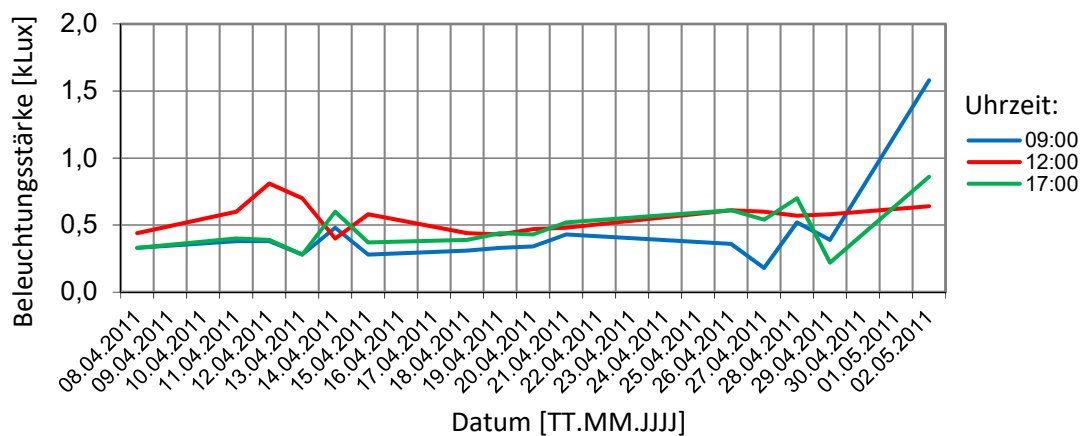


ABBILDUNG 19: HORIZONTALE BELEUCHTUNGSSTÄRKE AM FENSTER

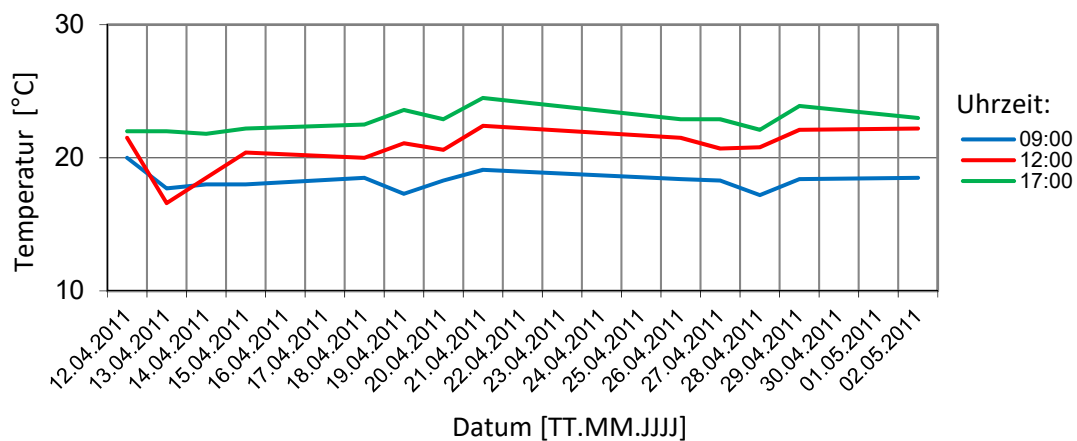


ABBILDUNG 20: RAUMTEMPERATUR

4.3 Lichteigenschaften

4.3.1 Technische Spezifikation

Für eine Untersuchung zur Beeinflussung von subjektivem Befinden und Ermüdung durch die Nachbildung von ultradianen Lichtwechseln wie bei einem natürlichen leicht bewölkten Himmel muss eine Lichtbedingung hergestellt werden, wie sie weitestgehend den Lichtbedingungen in der Natur entspricht. Eine großflächige, diffuse Lichtquelle wie beim Virtual-Sky entspricht einerseits dem natürlichen Himmel und lässt andererseits auch eine starke biologische Wirkung vermuten. Gegenüber dem Vorversuch geht hier die Nachbildung der natürlichen Dynamik über die zeitliche Dynamik hinaus und wird auch räumlich simuliert. Zeitlich wird neben der Helligkeit wie in der Natur auch die Farbtemperatur verändert, sodass die Simulation den natürlichen Lichtveränderungen der Natur entspricht. Aspekte, welche nicht simuliert werden sollen, sind die Polarisation des Lichts, da sie sehr schwer technisch zu realisieren ist und höchstwahrscheinlich keinen Einfluss auf den Menschen hat, sowie die hohen Beleuchtungsstärken. Bei voller Leistung könnten mit dem Virtual Sky Beleuchtungsstärken von über 3000 lx erreicht werden. Hohe Beleuchtungsstärken von über 2000 lx wie unter freiem Himmel sind am Bildschirmarbeitsplatz jedoch impraktikabel (aufgrund von Blendung, siehe Kapitel 4.3.3), verbrauchen viel Energie, werden für Büroarbeitsplätze nicht benötigt (Fuchs und Weyde 2014) und werden bei Kunstlicht im Raum bereits unangenehm empfunden (Muck und Bodmann 1961; Fischer 1970). Aufgrund des nahezu kontinuierlichen Spektrums des natürlichen Lichts kommen beim Virtual-Sky nicht nur RGB-LEDs zum Einsatz, sondern zusätzliche Weiß-LEDs zum Auffüllen der Lücken im Spektrum. Infrarote und ultraviolette Spektralanteile sind jedoch nicht enthalten. Der Virtual-Sky ist mit insgesamt 34.560 LEDs mit drei verschiedenen Grundfarben (RGB, rot: 620-630 nm, grün: 520-535 nm und blau: 465-475 nm) und Weiß (Tageslichtweiß: 5500 K) bestückt. Dadurch lassen sich über 16 Millionen Farben darstellen. Diese werden in insgesamt 240 (20 x 12) einzeln ansteuerbare Quadrate (30 x 30 cm) gruppiert, die wie Pixel eines Displays angesteuert werden können; so wird eine sowohl zeitlich als auch räumlich dynamische Beleuchtung möglich. Die Ansteuerung erfolgt mittels Software auf einem PC über DMX (Digital Multiplex). Vor die LED-Kacheln ist im Abstand von 30 cm eine Diffusor-Folie gespannt, um eine homogene Ausleuchtung zu gewährleisten. Eine überwiegend diffuse Beleuchtung wie beim Virtual-Sky erzeugt keine Schatten. Schatten unterstützen aber die Sehauflage und tragen zur Akzeptanz eines Raumes bei (LiTG, Deutsche Lichttechnik Gesellschaft e.V. 2016). Ergänzt wird darum die diffuse Beleuchtung des Virtual-Skys durch Arbeitsplatzleuchten (Trilux Neximo) mit Fokussierungsoptik und einer Farbtemperatur von 2800 K zur gezielten direkten Beleuchtung und Erzeugung von Schatten. Die Farbtemperatur des Virtual Sky lässt sich stufenlos von ca. 1500 K bis 27.000 K einstellen. Bei einer Farbtemperatur von 5600 K kann ein Farbwiedergabeindex von $R_a = 96$ erreicht werden. Durch die dynamische Steuerung

lassen sich Videos von vorbeiziehenden Wolken anzeigen. Der Virtual-Sky eignet sich somit insbesondere für dieses Experiment, da er nicht nur dem neuesten Wissenstand zur optimalen biologisch wirksamen Bürobeleuchtung entspricht, sondern auch die Simulation von räumlichen und zeitlichen Lichtwechseln ähnlich wie bei einem realen Wolkenhimmel ermöglicht.

4.3.2 Lichtszenarien

Die Wirkung dreier Lichtszenarien - statisch (S), seltene Dynamik (LD) und schnelle Dynamik (HD) - wird mittels einer Probandenstudie vergleichend untersucht. Tests und Fragebögen, die bei der Studie verwendet werden, sowie der Versuchsaufbau und weitere verwendete Methoden sind im Folgenden beschrieben.

1. **S:** Statisches Licht mit einem fixierten Wolkenbild am Virtual-Sky, ähnlich der traditionellen Raumbelichtung (siehe Abbildung 23)
2. **LD:** Seltene Dynamik: Alle 90 Minuten (zu den Pausenzeiten) verändert sich das Licht von einem Arbeitslicht (Farbtemperatur 6900 K) zu einem Pausenlicht (4600 K) (siehe Abbildung 23)
3. **HD:** Schnelle Dynamik: Ständige Lichtwechsel durch den animierten Wolkenhimmel, ähnlich wie Farbtemperatur- und Intensitätswechsel vorbeiziehender Wolken an einem leicht bewölkten Tag (siehe Abbildung 21 - 23)

Die schnelle Dynamik ist so optimiert, dass die Lichtwechsel auf dem Schreibtisch gerade noch wahrnehmbar sind und dadurch nicht von der Arbeit ablenken. Die mittlere Wahrnehmungsschwelle von Helligkeitsveränderungen liegt theoretisch bei einer minimalen Änderung der Intensität um 14 % beim photopischen Sehen (Cornsweet und Pinsker 1965). Die Änderung der Intensität wird auch als Modulation M bezeichnet und kann nach Formel 8 berechnet werden. Die Stärke der Lichtmodulation, die vom Betrachter gerade noch wahrgenommen wird, ist allerdings nicht nur abhängig von der Ausprägung der Veränderung (Geschwindigkeit, Stärke, räumliche Ausdehnung, Ort der Veränderung), sondern auch von der Art der durchgeführten Tätigkeit. Einen Hinweis darauf, wann Lichtmodulationen in der Umgebung bemerkt werden, geben Sephar und Owens (Sephar und Owens 2012). Aufgrund vieler Einflussparameter lassen sich hieraus jedoch keine theoretischen Werte ableiten. Darum wurde die Lichtmodulation bei „HD“ durch schrittweise Optimierung nach eigenem Ermessen und der subjektiven Einschätzung von Arbeitskollegen für den Versuch eigens komponiert. Die Veränderung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch bei der Wolkensimulation „HD“ ist in Abbildung 21 gezeigt. Nach sechs Minuten wiederholt sich das Wolkenmuster. Die Veränderung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch in Kombination mit der direkten Beleuchtung, wie im

Versuch bei der „HD“ Lichtbedingung angewendet, zeigt Abbildung 22. Die stärkste Modulation M auf dem Schreibtisch beträgt hierbei ca. 26 Prozent (Formel 8).

FORMEL 8: BERECHNUNG DER MODULATION

$$M = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} * 100\%$$

Zum Messen wurde die Software „LEiDs LED+LIGHT check“ mit dem Messgerät „BTS256“ von Gigahertz-Optik verwendet.

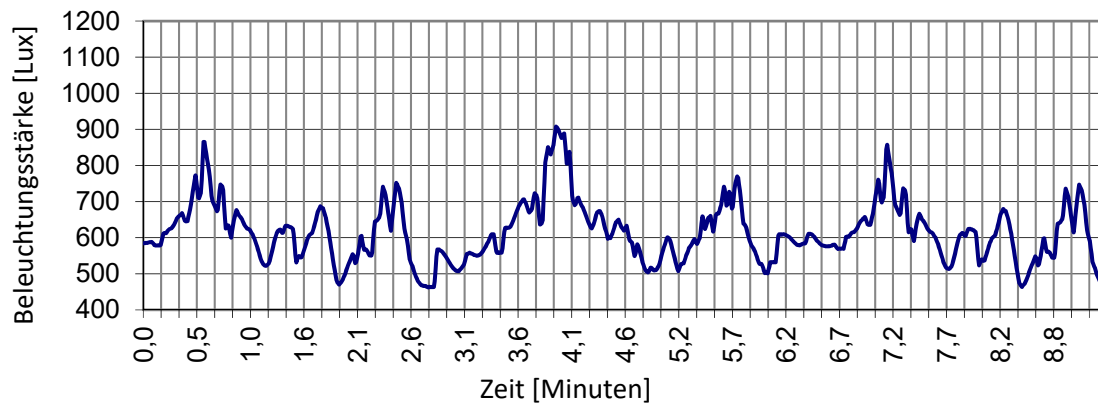


ABBILDUNG 21: VERÄNDERUNG DER BELEUCHTUNGSSTÄRKE AUF DEM SCHREIBTISCH DURCH DIE ANIMIERTE WOLKEN OHNE DIREKTE BELEUCHTUNG

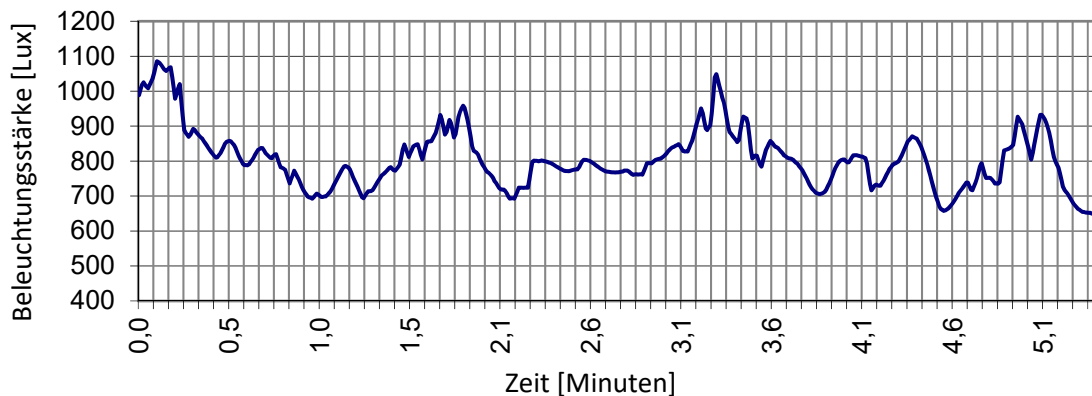


ABBILDUNG 22: VERÄNDERUNG DER BELEUCHTUNGSSTÄRKE AUF DEM SCHREIBTISCH DURCH DIE ANIMIERTE WOLKEN INKLUSIVE DIREKTER BELEUCHTUNG. DIE MODULATION BETRÄGT 26% (LICHTBEDINGUNG HD)

Die mittlere Farbtemperatur beträgt bei den drei Bedingungen jeweils ca. 6250 K, die mittlere Beleuchtungsstärke, gemittelt über den Arbeitstag, jeweils ca. 900 lx. Dadurch wird sichergestellt, dass bei nahezu identischem Blauanteil und gleicher Beleuchtungsstärke die gleiche biologische Wirkung bei allen drei Bedingungen gegeben ist. Die durchschnittliche Farbtemperatur bezieht sich bei S auf unterschiedliche Bereiche auf dem Schreibtisch. Bei LD und HD bezieht sie sich auf unterschiedliche Bereiche auf dem Tisch sowie auf die Dynamik. Gleiches gilt für die Beleuchtungsstärke und die

Farbwiedergabe. Bei HD mussten die animierten Wolken schrittweise auf die weitestgehend gleiche Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke eingestellt werden. Entsprechend des Studiendesigns und der Erkenntnisse von Rimmer und Czeisler (Rimmer et al. 2000; Czeisler et al. 2001), welche bei wechselnden Beleuchtungsstärken und weniger integrierten Luxstunden stärkere Effekte auf den Menschen zeigten, wird bei der Simulation des Wolkenhimmels (HD) die Beleuchtungsstärke gegenüber der statischen Lichtbedingung (S) und der seltenen Dynamik (LD) um 10% reduziert. Als Messgerät wurde das „HCT-99“ von Gigahertz-Optik verwendet. Die Lichteigenschaften sind in Abbildung 23 zusammengefasst.

	Farbtemperatur [K]	Beleuchtungsstärke [lx]	Farbwiedergabe, Ra
Statisch	Ø = 6250 max. = 6900 min. = 5776	Ø = 945 max. = 1140 min. = 850	Ø = 93 max. = 94 min. = 92
LD	Ø = 6250 max. = 6900 min. = 4600 (Pause)	Ø = 945 max. = 1140 min. = 850 (Pause)	Ø = 93 max. = 94 min. = 88 (Pause)
HD	Ø = 6273 max. = 8200 min. = 5100	Ø = 850 max. = 1000 min. = 580	Ø = 80 max. = 85 min. = 70

ABBILDUNG 23: LICHTEIGENSCHAFTEN AUF DEM SCHREIBTISCH BEI DEN DREI VERSUCHSBEDINGUNGEN

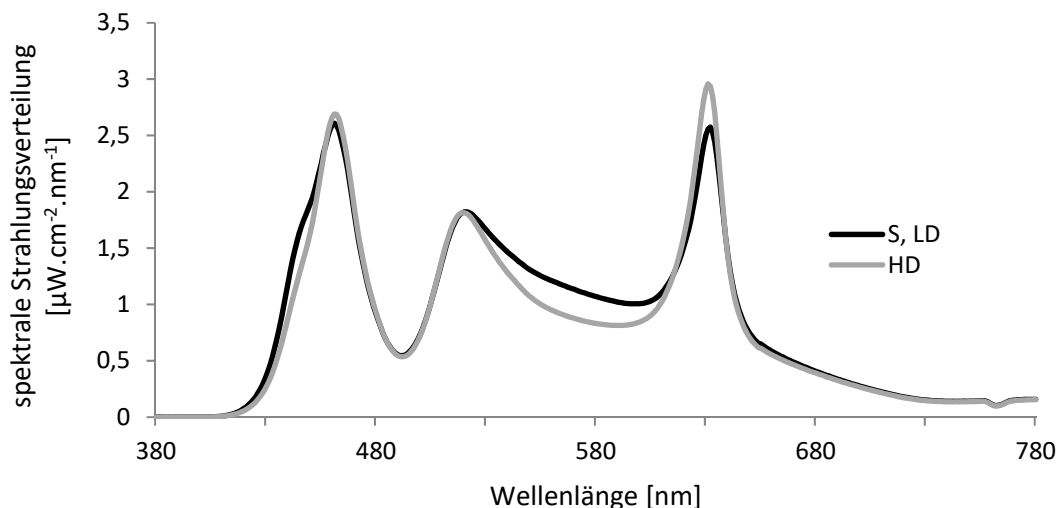


ABBILDUNG 24: SPEKTRALE STRAHLUNGSVERTEILUNG BEI DER VIRTUAL-SKY-STUDIE. DER AKTIVIERENDE BLAUANTEIL IST BEI ALLEN DREI BEDINGUNGEN GLEICH.

4.3.3 Bewertung der psychologischen Blendung

Die Leuchtdichtevertelung im Raum wurde so gewählt, dass eine Blendung der Versuchsteilnehmer vermieden wurde. Der Grad der psychologischen Blendung einer Beleuchtungssituation wird häufig durch das sogenannte „UGR-Verfahren“ (URG, engl. Unified Glare Rating) bestimmt: Für Arbeiten wie Lesen, Schreiben und Computerarbeit sollte z. B. ein UGR Wert von 19 nicht überschritten werden (DIN EN 12464-1). Die dem UGR-Verfahren zugrundeliegende Formel lautet:

FORMEL 9: BERECHNUNG DER BLENDUNG MIT HILFE DES UGR-VERFAHRENS

$$UGR = 8 * \log_{10} ((0,25 / L_b) \sum ((L^2 * \Omega) / P^2))$$

Dabei ist:

L_b die Hintergrundleuchtdichte in cd/m^2

L die mittlere Leuchtdichte in cd/m^2

Ω der Raumwinkel in der leuchtenden Fläche der Leuchte vom Beobachter aus gesehen

P der Positionsindex nach Guth für jede einzelne Leuchte bezüglich der Blickrichtung.

Das UGR Verfahren ist jedoch nicht für indirekte, diffuse Beleuchtung (wie beim Virtual-Sky) oder Fenster geeignet und wird als Verfahren zur Beurteilung der Blendung von Boyce generell kritisiert (Boyce 2014). Für Bildschirme mit einer Hintergrundleuchtdichte $L < 200 \text{ cd/m}^2$ dürfen die Leuchten eine Leuchtdichte von 1.500 cd/m^2 nicht überschreiten (DIN EN 12464-1). Wie Abbildung 25 und Abbildung 26 entnommen werden kann, erreicht der Virtual-Sky maximal ca. 1000 cd/m^2 . Die verwendeten Displays haben eine Leuchtdichte von 250 cd/m^2 . Damit wäre eine Umgebungsleuchtdichte von bis zu 3000 cd/m^2 zulässig. Die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichtevertelung in der Arbeitsumgebung ist alternativ und vielseitiger anwendbar als der UGR Wert. Generell wird empfohlen, dass Leuchtdichteverhältnisse zwischen Tisch und Bildschirm nicht größer als 1:3 sowie zwischen Umgebung und Bildschirm nicht größer als 1:10 sind. Boyce zeigt, dass es zahlreiche Studien zur Akzeptanz von Leuchtdichteunterschieden gibt, die in ihren Ergebnissen voneinander abweichen. Darum soll man seiner Ansicht nach die Kriterien zur Gleichmäßigkeit nur als Empfehlung sehen und nicht als eine Sache von „Leben und Tod“ (Boyce 2014). Bei der Virtual-Sky-Studie sind die Leuchtdichteverhältnisse zwischen Display und Tisch ca. 1:1 und zwischen Display und Umgebung maximal ca. 1:4 (Abbildung 25, Abbildung 26).



ABBILDUNG 25: LEUCHTDICHTEN BEI DER VIRTUAL-SKY-STUDIE. DIE LEUCHTDICHTEN SIND IN CD/M^2 FARBlich KODIERT: LINKS VON $5 \text{ CD}/\text{M}^2$ (DUNKELBLAU) BIS $383,9 \text{ CD}/\text{M}^2$ (WEIß), RECHTS VON $20 \text{ CD}/\text{M}^2$ (DUNKELBLAU) BIS $1672 \text{ CD}/\text{M}^2$ (WEIß)

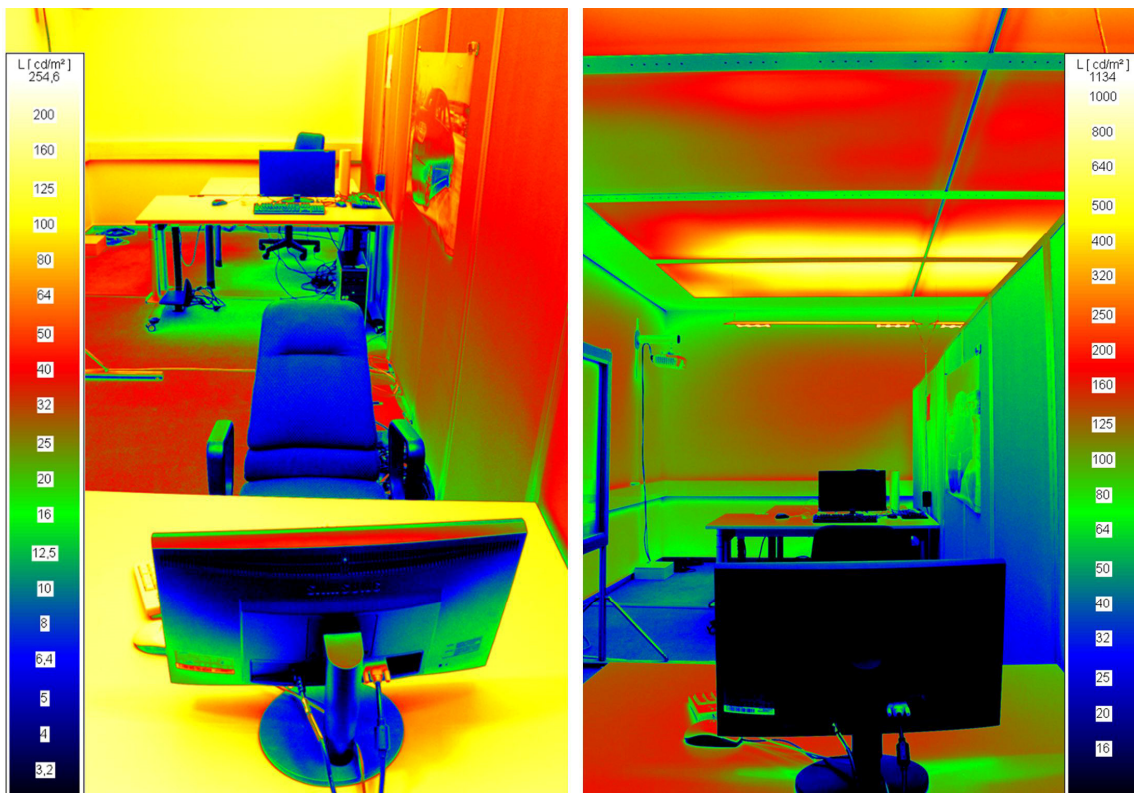


ABBILDUNG 26: LEUCHTDICHTEN BEI DER VIRTUAL-SKY-STUDIE. DIE LEUCHTDICHTEN SIND IN CD/M^2 FARBlich KODIERT: LINKS VON $3,2 \text{ CD}/\text{M}^2$ (DUNKELBLAU) BIS $254,6 \text{ CD}/\text{M}^2$ (WEIß), RECHTS VON $16 \text{ CD}/\text{M}^2$ (DUNKELBLAU) BIS $1134 \text{ CD}/\text{M}^2$ (WEIß)

4.3.4 Visuelle & nicht-visuelle Lichtwirkung

Die Spektren der untersuchten Szenarien „Statisches Licht“ (S) und „Schnelle Dynamik“ (HD) sind bezüglich ihrer Wirkung auf die fünf Photorezeptoren (Rot-, Grün-, Blauzapfen, Stäbchen und ipRGCs) im Auge berechnet (Abbildung 27). Die Messergebnisse wurden mit der "Irradiance Toolbox" berechnet (Lucas et al. 2014a). Hierbei wird wie bei der Ermittlung des Hellempfindens des menschlichen Auges vorgegangen: Das menschliche Auge nimmt zwar elektromagnetische Wellen im Bereich von 380 nm bis 780 nm als Licht wahr, nicht alle Wellenlängen werden aber gleich „hell“ wahrgenommen. Licht wird also nicht nach seiner physikalischen Leistung bewertet, sondern nach der physiologischen Helligkeitsempfindung des menschlichen Auges beim Tagsehen. Das spektrale Hellempfinden des menschlichen Auges ist eine Funktion der Wellenlänge und wird als $V(\lambda)$ -Funktion bezeichnet. Wird die physikalische Leistung des Lichts mit dem jeweiligen Hellempfinden der fünf Rezeptoren bewertet, ergibt sich für jeden Rezeptor einen auf die menschliche Wahrnehmung angepassten Wert. Damit ergäbe sich, wie bei der $V(\lambda)$ -Funktion, für jeden Rezeptor die photometrische Beleuchtungsstärke. Es jedoch darauf zu achten, dass die Einheit Lux für die Beleuchtungsstärke eine SI-Einheit ist und ausschließlich für die Beleuchtungsstärke, also für die Hellempfindlichkeit des Auges, verwendet werden darf. Darum muss unbedingt kenntlich gemacht werden, dass es sich bei den Ergebnissen der „Irradiance Toolbox“ jeweils um einen Messwert für nur einen einzelnen Rezeptor handelt. Lucas schlägt darum vor, „ α -opic“ an den jeweiligen Wert voranzustellen (Lucas et al. 2014a). α wird dabei durch das jeweilige Kürzel der fünf Photorezeptoren ersetzt. Für die Blaurezeptoren wird „sc“ verwendet (sc, engl. short wavelength sensitive cones). „Z“ wird für die melanopsinhaltigen Ganglienzellen (ipRGC) verwendet. Die Stäbchen erhalten das Kürzel „r“ (r, engl. rods). Für die Grünrezeptoren wird „mc“ verwendet (mc, engl. middle wavelength sensitive cones). Die Rotrezeptoren erhalten schließlich die Abkürzung „lc“ (lc, engl. long wavelength sensitive cones). So kann folglich vom Spektrum einer Lichtquelle auch zukünftig, bei neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen zur nicht-visuellen Wirkung von Licht, rückgeschlossen werden, wie stark die Stäbchen, Zapfen und die ipRGCs aufgrund der Energie der absorbierten Photonen zu einer möglichen nicht-visuellen Wirkung beigetragen haben (Ámundadóttir 2016). Die Vergleichbarkeit zwischen den drei unterschiedlichen Lichtbedingungen hinsichtlich ihrer Lichtwirkung auf alle fünf Photorezeptoren ist bei Betrachtung von Abbildung 27 verdeutlicht. Eine zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung über das Auge vermittelte nicht-visuelle Wirkung des Lichtes kann weitestgehend ausgeschlossen werden und es kann davon ausgegangen werden, dass die Unterschiede bei der Lichtwirkung auf psychologische und/oder neurologische Effekte zurückzuführen sind. Sollte sich dennoch die nicht-visuelle Wirkung unterscheiden, so wäre diese Wirkung beim statischen Licht geringfügig stärker. Abbildung 27 vergleicht die Bestrahlungsstärken der fünf Photorezeptoren im Auge für die beiden untersuchten Szenarien „Statisches Licht“ (S) und „Schnelle Dynamik“ (HD).

Gemessen wurde auf der Tischoberfläche. Bei der schnellen Dynamik (HD) handelt es sich um den Mittelwert aus Messungen zu sechs unterschiedlichen Zeitpunkten. Die „Seltene Dynamik“ (LD) ist nicht dargestellt, da sie während der sechs Stunden und dreißig Minuten dauernden Arbeitszeiten das gleiche Spektrum wie das statische Licht aufweist. Die Messung wurde mit einem Konika-Minolta CS 1000 Spektroradiometer durchgeführt.

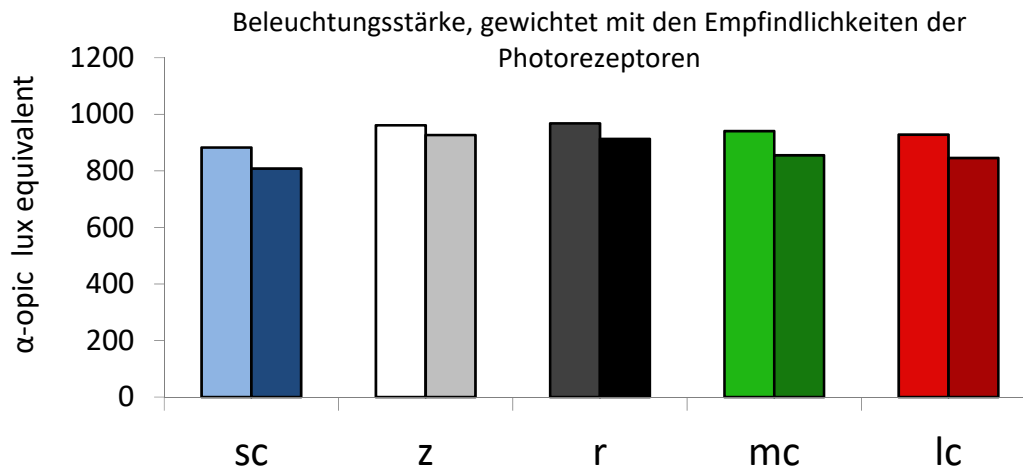


ABBILDUNG 27: DER RECHTE, DUNKLERE BALKEN ZEIGT DIE WERTE FÜR DIE SCHNELLE DYNAMIK, DER LINKE, HELLERE BALKEN ZEIGT DIE WERTE FÜR DAS STATISCHE LICHT (MOD. NACH [121])

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Empfindlichkeitsmaxima der fünf Photorezeptoren im Auge und die sich daraus ergebende Bestrahlungsstärke pro Rezeptor. Diese Werte sind mit *prereceptor filtering* korrigiert, d.h. die Filterwirkung, die die optischen Medien, Cornea, Linse und Kammerwasser haben, wird berücksichtigt. Die Berechnungen basieren auf einem 32-jährigen Standardbeobachter mit einem 10° großen Gesichtsfeld (Lucas et al. 2014a).

TABELLE 4: BESTRAHLUNGSSTÄRKE, GEWICHTET MIT DEN EMPFINDLICHKEITEN DER FÜNF PHOTOREZEPTOREN IM AUGE BEI STATISCH (S) UND SELTENER DYNAMIK (LD)

Photorezeptor	λ_{\max}	α in $N_{\alpha}(\lambda)$	Kurve	α -opic lux
S cone	419,0	sc	$N_{sc}(\lambda)$	882,60
Melanopsin	480,0	z	$N_z(\lambda)$	961,24
Rod	496,3	r	$N_r(\lambda)$	967,92
M cone	530,8	mc	$N_{mc}(\lambda)$	940,46
L cone	558,4	lc	$N_{lc}(\lambda)$	927,89

TABELLE 5: BESTRAHLUNGSSTÄRKE, GEWICHTET MIT DEN EMPFINDLICHKEITEN DER FÜNF PHOTOREZEPTOREN IM AUGE BEI SCHNELLER DYNAMIK (HD)

Photorezeptor	λ_{\max}	α in $N_{\alpha}(\lambda)$	Kurve	α -opic lux
S cone	419,0	sc	$N_{sc}(\lambda)$	808,20
Melanopsin	480,0	z	$N_z(\lambda)$	926,58
Rod	496,3	r	$N_r(\lambda)$	913,05
M cone	530,8	mc	$N_{mc}(\lambda)$	854,91
L cone	558,4	lc	$N_{lc}(\lambda)$	845,27

Nach den Formeln aus der DIN SPEC 5031-100 ergeben sich folgende Ergebnisse für die Virtual-Sky-Studie (Tabelle 6):

TABELLE 6: VERGLEICH DES MELANOPISCHEN WIRKFAKTORS UND DER MELANOPISCHEN TAGESLICHT-ÄQUIVALENTEN BELEUCHTUNGSSTÄRKE BEI DER VIRTUAL-SKY-STUDIE

	Berechnung nach DIN V 5031-100	
	S & LD	HD
Melanopischer Wirkfaktor	$a_{mel,v} = 0,835$	$a_{mel,v} = 0,894$
Melanopische tageslicht-äquivalente Beleuchtungsstärke	$E_{v,mel,D65} = 870,62 \text{ lx}$	$E_{v,mel,D65} = 839,20 \text{ lx}$

Da noch keine ausreichend gesicherten Erkenntnisse im Bereich künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung bestehen um z. B. Anforderungen an die Planung festlegen zu können, sollen diese Ergebnisse bewusst nicht bewertet werden, sondern die Lichtbedingungen nur objektiv beschreiben und für ein späteres gesichertes Verständnis für biologische Wirkung von Licht bereitgestellt werden. Die Kommission Arbeitsschutz und Normung (KAN) sagt in ihrem Positionspapier vom August 2015, dass Normung im Bereich „Anforderungen oder Empfehlungen für die Planung und den Betrieb künstlicher, biologisch wirksamer Beleuchtung an Arbeitsplätzen“ aktuell nicht sinnvoll und außerdem nicht zulässig ist (Kommission Arbeitsschutz und Normung 2015).

4.4 Probandenkollektiv

Der Stichprobenumfang kann mit Hilfe von Tabellen oder einer Fallzahlkalkulation ermittelt werden. Zuvor müssen jedoch Werte für Signifikanzniveau, Effektgröße und Teststärke festgelegt werden. Das Signifikanzniveau wird, wie oft in der Literatur vorgeschlagen, auf 0,05 gesetzt. Es wird eine mittlere Effektgröße von $d = 0,5$ gewählt und die Teststärke wird auf 0,8 festgelegt. Mit den festgelegten

Werten ergibt sich ein Stichprobenumfang von $n = 27$ Probanden (Machin 2009). Um einen reibungslosen Ablauf der Versuche zu gewährleisten, werden für die Virtual-Sky Studie 30 Probanden eingeladen. Somit kann möglichen kurzfristigen Ausfällen entgegengewirkt werden. Da im Voraus die Standardabweichung der Ergebnisse der verschiedenen Tests nicht bekannt war und auch die relevanten Differenzen zwischen den einzelnen Szenarien bei allen Tests geschätzt werden mussten, wurden parallel zur oben erwähnten Tabelle mehrere Berechnungen durchgeführt, welche einen Stichprobenumfang von 29 bis 36 Probanden ergaben. Zur Fallzahlkalkulation wurde die Formel von Kutschmann (Kutschmann et al. 2006) verwendet. Sie beinhaltet bereits das Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ und die Teststärke von 0,8.

FORMEL 10: FALLZAHLKALKULATION

$$n = 16 * \frac{\sigma^2}{d^2}$$

Die 30 Testpersonen werden drei verschiedenen Lichtsituationen ausgesetzt: Statisches Licht, schnelle Dynamik (entsprechend der Ergebnisse aus der Vorstudie) und eine Veränderung von Arbeitslicht zu Pausenlicht, da dies in einer Schule als positiv bewertet wurde (Schulte-Marktwort 2010).

Der Mensch, vor allem dessen Seheigenschaften und Chronotyp, muss bei Experimenten mit Licht möglichst gleich und kontrolliert sein. Die Probanden müssen erwachsen sein und dürfen nicht unter einer Störung des Sehapparates leiden. Damit dies auch ohne augenärztliche Untersuchung bzw. nur durch Befragung gewährleistet ist, sollen die Versuchsteilnehmer über 18 Jahren sein aber nicht älter als 35 Jahre, da bei älteren Menschen eine Beeinträchtigung des Sehens wahrscheinlicher ist (Weale 1988). Des Weiteren wurde so auch die höchste Wahrscheinlichkeit des gleichen Chronotyps sichergestellt, da erstens eine Altersgruppe auch einem bestimmten Chronotyp entspricht und zweitens diese Altersgruppe eine geringe Varianz im Chronotyp aufweist (Roenneberg et al. 2004; Roenneberg et al. 2003; Roenneberg 2004; Foster und Roenneberg 2008). Die Probanden dürfen während der letzten 3 Monate keine Schichtarbeit geleistet haben und auf keinen Langstreckenflügen innerhalb des letzten Monats unterwegs gewesen sein. Allergiker (Hautallergien, Heuschnupfen, Asthma) sowie Raucher sind vom Versuch ausgeschlossen (Nichtraucher dürfen nicht vor weniger als 3 Monaten mit dem Rauchen aufgehört haben). Innerhalb der letzten drei Monate dürfen die Probanden ebenfalls nicht an einer anderen klinischen Studie teilgenommen, Blut gespendet und regelmäßig Medikamente eingenommen haben. Probanden dürfen weder unter Migräne- oder Epilepsieanfällen noch unter Erkrankungen somatischen Ursprungs (Herz, Lunge, Nieren, Leber, Magen und Darm, Blut) leiden. Sie dürfen kein neurologisches oder psychiatrisches Leiden haben und nicht schwanger sein. Die Probanden dürfen generell keine übermäßigen Mengen Alkohol und keine Drogen

zu sich nehmen. Diese Ausschlusskriterien werden nicht durch Blutproben o.ä. überprüft. Die Eignung für den Versuch wird ausschließlich mit der Unterschrift der Probanden bestätigt.

Aus den Bewerbern wurden 14 Frauen und 16 Männer zwischen 22 und 33 Jahre (\bar{x} 25 Jahre) für die Studie ausgewählt. In der Studie, die während drei Wochen im April 2011 durchgeführt wurde, wurde jede Person unter drei verschiedenen Lichtbedingungen jeweils an einem Arbeitstag zwischen 9:00 Uhr und 17:00 Uhr untersucht.

4.5 Versuchsablauf

Die Versuchsteilnehmer nehmen jeweils dreimal für 8 Stunden von 9:00 -17:00 Uhr am Experiment im Lichtlabor des Fraunhofer IAO teil. Sie werden angehalten, jeweils die gleiche Art der Anreise zu wählen. Studienbeginn war der 8.4.2011, Studienende war der 2.5.2011. Jeder Versuchsteilnehmer nimmt in drei aufeinanderfolgenden Wochen am gleichen Wochentag teil, sodass individuelle Randbedingungen weitestgehend konstant gehalten werden. Ein Aussetzen bzw. Nachtermine sind nicht gestattet. Während der Studie gibt es definierte Pausenzeiten (10:30 – 10:45, 12:00 – 13:00, 14:30 – 14:45 Uhr). Für die Dauer der Studie befinden sich die Probanden in sitzender Position und dürfen jeweils nur zu den Pausenzeiten das Labor verlassen. Abgesehen von den Pausenzeiten dürfen die Probanden das Labor maximal drei Minuten verlassen. Während der gesamten Studiendauer dürfen die Probanden in den Pausenzeiten ihre gewohnten Mahlzeiten sowie Kaffee und Tee zu sich nehmen. An den drei Studientagen sollen sie jedoch ähnliche Ess- und Trinkgewohnheiten beibehalten, sie werden daher schriftlich dokumentiert. Während der Untersuchungszeiten dürfen die Probanden arbeiten woran sie möchten, allerdings sollen sie an jedem der drei Tage ähnliche Tätigkeiten (z. B. 3x für Prüfung lernen, 3x Videoschnitt) durchführen. Die Teilnehmer dürfen sich kurz unterhalten, Dauergespräche sind aber nicht erlaubt. Während der gesamten Studiendauer werden die Teilnehmer von einer Person aus dem Fraunhofer Team betreut und beobachtet, dessen Anweisungen Folge zu leisten sind. Die Probanden dürfen keinen Besuch empfangen, sie sind jedoch jederzeit über Telefon sowie Fax und E-Mail erreichbar. An allen drei Studientagen ist das Protokoll bis auf die Lichtexposition identisch. Alle Versuchsanforderungen wurden eingehalten. An jedem Versuchstag wird folgendes Programm durchlaufen:

- 9:00 Uhr: Betreten des Labors, Ausfüllen des Eingangsfragebogens und des Wohlbefindlichkeitsfragebogens
- 9:20 – 10:25 Uhr: Eigene Arbeiten
- 10:25 – 10:30 Uhr: Ausfüllen des Wohlbefindlichkeitsfragebogens (bei LD wechselt direkt vor der Pause innerhalb von 30 Sekunden das Licht von 6300 K zu 4600 K)
- 10:30 – 10:45 Uhr: Pause (bei LD mit 4600 K)
- 10:45 – 11:55 Uhr: Eigene Arbeiten (bei LD wechselt das Licht direkt nach der Pause)

- innerhalb von 30 Sekunden von 4600 K zu 6300 K, anschließend wird bei 6300 K gearbeitet)
- 11:55 – 12:00 Uhr: Ausfüllen des Wohlbefindlichkeitsfragebogens (bei LD wechselt direkt vor der Pause innerhalb von 30 Sekunden das Licht von 6300 K zu 4600 K)
 - 12:00 – 13:00 Uhr: Mittagspause (zur Sicherstellung der Einwirkung des Wechsels von Pausenlicht zu Arbeitslicht auf die Probanden ist bei LD 4600 K bis 13:05 Uhr aktiviert)
 - 13:00 – 13:15 Uhr: Ausfüllen des Mittagsfragebogens und des Wohlbefindlichkeitsfragebogens (bei LD wechselt das Licht innerhalb von 30 Sekunden von 4600 K zu 6300 K)
 - 13:15 – 14:25 Uhr: Eigene Arbeiten (bei LD mit 6300 K)
 - 14:25 – 14:30 Uhr: Ausfüllen des Wohlbefindlichkeitsfragebogens (bei LD wechselt das Licht innerhalb von 30 Sekunden von 6300 K zu 4600 K)
 - 14:30 – 14:45 Uhr: Pause (bei LD mit 4600 K)
 - 14:45 – 15:45 Uhr: Eigene Arbeiten (bei LD wechselt das Licht im Anschluss an die Pause innerhalb von 30 Sekunden von 4600 K zu 6300 K, anschließend wird bei 6300 K gearbeitet)
 - 15:45 – 15:50 Uhr: Ausfüllen des Wohlbefindlichkeitsfragebogens (bei LD wechselt das Licht innerhalb von 30 Sekunden von 6300 K zu 4600 K)
 - 15:50 – 16:45 Uhr: Eigene Arbeiten (bei LD wechselt das Licht innerhalb von 30 Sekunden von 4600 K zu 6300 K, anschließend wird bei 6300 K gearbeitet)
 - 16:45 – 17:00 Uhr: Ausfüllen des Abschlussfragebogens und des Wohlbefindlichkeitsfragebogens
 - 17:00 Uhr: Ende des Versuchs (bei LD wechselt das Licht innerhalb von 30 Sekunden von 6300 K zu 4600 K)

Die Reihenfolge der Lichtbedingungen war randomisiert und ist TABELLE 7 zu entnehmen.

TABELLE 7: RANDOMISIERTE REIHENFOLGE DER LICHTBEDINGUNGEN

	Woche 1					Woche 2					Woche 3				
Gr.	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr
1	S					LD					HD				
2		LD					S					HD			
3			HD					LD					S		
4				S					HD					LD	
5					HD					S					LD

TABELLE 8: LISTE DER ANONYMISIERTEN TEILNEHMER

	Woche 1 im April					Woche 2 im April					Woche 3 im April					
Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Mo
8.	11.	12.	13.	14.	15.	18.	19.	20.	21.	22.	25.	26.	27.	28.	29.	2.5.
3	6	33	7	10	3	6	33	7	10			33	7	10	3	6
5	8	2	9	14	5	8	2	9	14			2	9	14	5	8
21	13	20	11	25	21	13	20	11	25			20	11	25	21	13
16	22	19	12	26	16	22	19	12	26			19	12	26	16	22
29	27	23	17	31	29	27	23	17	31			23	17	31	29	27
30	28	24	18	32	30	28	24	18	32			24	18	32	30	28

4.6 Ergebnisse der Untersuchungen zur örtlich dynamischen Beleuchtung

An dieser Stelle soll an die Forschungsfragen, die zu den im Folgenden formulierten Hypothesen geführt haben, erinnert werden:

- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektive Müdigkeit am Tage reduzieren?
- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektiven Befindlichkeiten verändern?
- ➔ Existieren unterschiedliche Effekte bezüglich Art der Tätigkeit?
- ➔ Kann ultradiane dynamische Beleuchtung psychologisch aktivieren?

Hypothese H0: Die Abweichungen von Müdigkeit, Aktivierung und Wohlbefinden zwischen dynamischem Licht und statischem Licht liegen unterhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$ und können auf natürliche Fluktuationen zurückgeführt werden.

Hypothese H1: Die Abweichungen von Müdigkeit, Aktivierung und Wohlbefinden zwischen dynamischem Licht und statischem Licht liegen oberhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden.

Um zunächst die Ausprägung und die natürlichen Fluktuationen der abhängigen Variable „Müdigkeit“ zu bestimmen, wurde jeden Morgen vor dem Experiment die Müdigkeit mit der KSS gemessen. Daraufhin wird die Größe der Störfaktoren wie Wetter, Schlafdauer, Art der Anreise und Wochentag ermittelt.

4.6.1 Müdigkeit am Morgen

Zur Identifizierung eines möglichen Einflusses des Wetters und der Art der Anreise auf die Müdigkeit am Morgen ist dieser Zusammenhang ausgewertet. Bei 3 x Regen / stark bewölkt war die Müdigkeit

KSS (1-10) = 3,11 und bei 12 x sonnig / leicht bewölkt KSS (1-10) = 3,78. Die Probanden waren also bei schlechtem Wetter etwas wacher ($p = 0,028$). Möglicherweise ist dies auf den Wechsel von verhältnismäßig dunklem Tageslicht zum relativ hell beleuchteten Innenraum zurückzuführen, sodass dieser bei schlechtem Wetter aktivierend wirkt. Es konnte keine Korrelation zwischen der verbrachten Zeit unter freiem Himmel und der Müdigkeit am Morgen festgestellt werden ($p_s = -0,01$). Für jeden Wochentag ist die subjektive Müdigkeit mit der Karolinska Sleepiness Scale am Morgen sowie die Schlafdauer ausgewertet (Abbildung 28). Entsprechend der Erwartung ist bei längerer Schlafdauer die Müdigkeit am Morgen geringer, was sich durch eine Korrelation von $p_s = -0,33$ zeigt. Eine Auffälligkeit besteht in der geringeren Müdigkeit mittwochs. Hier haben die Teilnehmer am längsten geschlafen und waren am Morgen wacher. Eine Erklärung für diese Auffälligkeit kann der Wochenrhythmus sein.¹ Die mittlere Beleuchtungsstärke zur Zeit der Anreise (8:45 - 9:00 Uhr) gemessen auf dem Dach des Gebäudes in Richtung Süd, Ost und West lag zwischen ca. 9.000 lx und 17.000 lx.

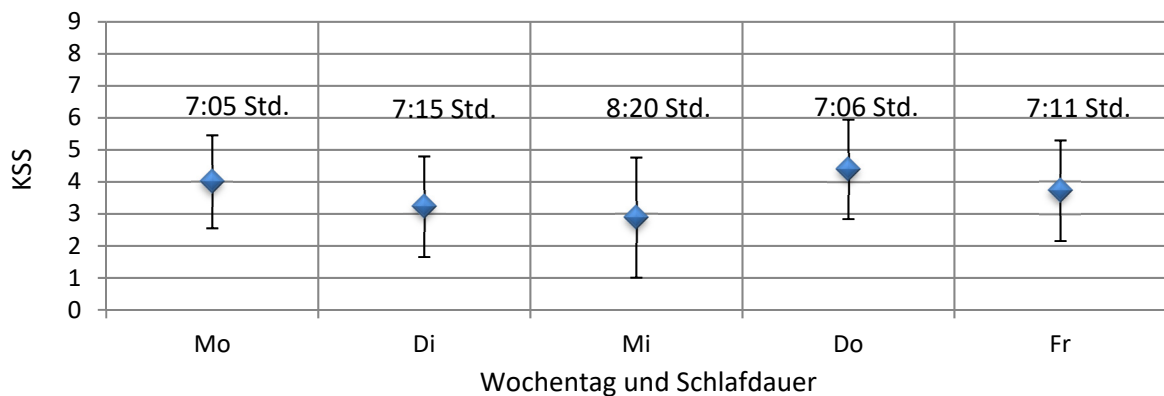
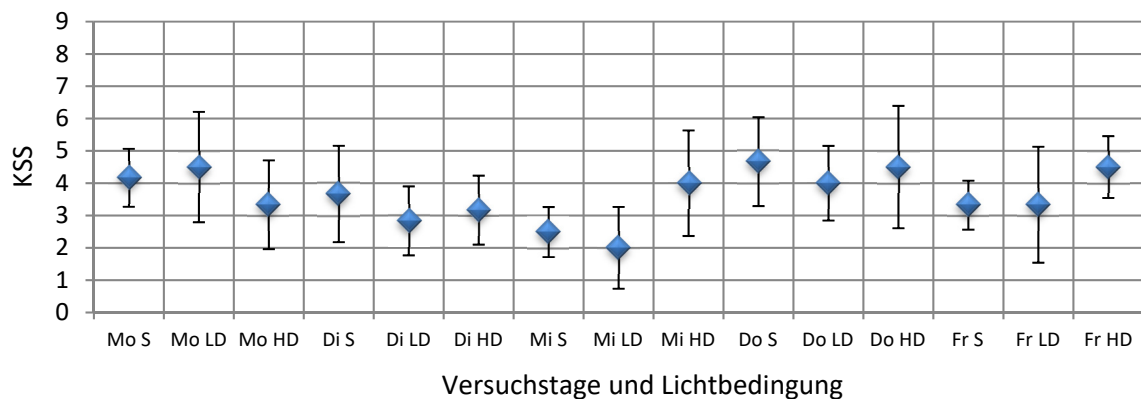


ABBILDUNG 28: SUBJEKTIVE MÜDIGKEIT AM MORGEN UND SCHLAFDAUER IN ABHÄNGIGKEIT VOM WOCHENTAG UND DER SCHLAFDAUER. ES BESTEHT EINE NEGATIVE KORRELATION VON $R = -0,33$ ZWISCHEN SCHLAFDAUER UND MÜDIGKEIT AM MORGEN.



¹ Eine weitere Erklärung kann der Ausfall der S-Bahn an einem Mittwoch liefern. Die Art der Anreise hat nur an diesem einen Tag Einfluss auf die Müdigkeit am Morgen: An diesem Mittwoch (Mi LD) ist die S-Bahn nicht gefahren und somit waren viele Teilnehmer länger zu Fuß unterwegs und im Schnitt 15 Minuten länger unter freiem Himmel (Abbildung 29).

ABBILDUNG 29: SUBJEKTIVE MÜDIGKEIT AM MORGEN DER EINZELNEN VERSUCHSTAGE

4.6.2 Dokumentation der Tätigkeiten der Probanden

Zur Beantwortung der Forschungsfrage

➔ Existieren unterschiedliche Effekte bezüglich der Art der Tätigkeit?

müssen die Tätigkeiten der Teilnehmer dokumentiert werden. Im Folgenden sind die wörtlichen Zitate der Teilnehmer auf die am Ende des Versuchstags gestellten Frage „Welche Tätigkeiten haben Sie heute durchgeführt?“ protokolliert.

Folgenden Arbeiten wurden montags durchgeführt: „Ich habe für eine Prüfung gelernt“ (6x). „Entwicklung eines Konzepts für die Aufhängung eines Monitors“. „Studienarbeit“ (3x). „Drehbuch lesen (120 Seiten) und für jede Szene die Lesezeit stoppen, Tabellen anlegen, Zeilen ausrechnen, Materialsichtung, Recherche“. „Literaturrecherche Konzeption einer tragbaren Aufhängung/Gestelles“. „Drehbuchanalyse, Koproduktion für einen Spielfilm (ZDF)“. „Bachelor Arbeit“. „Text korrigiert, Literaturrecherche“. „Ich habe gelesen und im Internet recherchiert“. „Kommende Reise vorbereitet, Tabelle für Diplomfilm erstellt“.

Folgenden Arbeiten wurden dienstags durchgeführt: „Korrespondenz“ (2x). „Habe mehrere Mails beantwortet“. „Hausarbeit“ (2x). „Internetrecherche, gelesen“. „Probandentermine organisieren für Simulatorversuche im Mai“. „Internet“ (4x). „Projektarbeit“. „Vorbereitung für Prüfung“ (2x). „Gelesen: Uni-Zeitschriften, im Internet Nachrichten bzgl. Explosion in Belarus“. „PC-Spiele“ (6x). „Safeway2School Projektvorbereitung, Organisation d. TN usw.“. „Studienarbeit“ (2x). „Verwaltungsarbeiten“. „Protokolle am PC geschrieben“.

Folgenden Arbeiten wurden mittwochs durchgeführt: „Studienunterlagen gelesen, einige Aufgaben für Web-Design gemacht“. „Übungsaufgabe für Uni“ (2x). „Englische Literatur“ (2x). „Internetrecherche“ (2x). „Internetfernsehen“ (2x). „Projektbericht“ (2x). „Mathehausübung“. „Für die Prüfung gelernt“ (6x). „Einiges von Web-Design nachgeschaut (fürs Studium)“. „Buch zusammengefasst, Stoffwechselwege gelernt, Lernkarten gelernt und im Internet gesurft“. „Projektarbeit“. „Recherche im I-net“. „Ich habe die Web-Design Übungen gemacht“. „Eine Präsentation vorbereitet“.

Folgenden Arbeiten wurden donnerstags durchgeführt: „Philosophiehausarbeit“ (2x). „Praxissemesterbericht für die Hochschule“. „Internet gesurft“ (3x). „Hausarbeit“ (3x). „Zusammenfassung eines Themas, diverses“. „Masterthesis“ (3x). „Auf eine Prüfung vorbereitet“ (4x). „Viel gelesen und geschrieben, unbekannte Begriffe im Internet nachgeschlagen“. „Philosophieprotokolle“. „Präsentation (Studium), Studienarbeit“. „Lateinvokabeln, versch.“

philosophische Texte“. „Praxissemesterbericht geschrieben“. „Ein bisschen gelesen“. „Diverse kleinere Aufgaben“. „Aufzeichnungen“.

Folgenden Arbeiten wurden freitags durchgeführt: *„Interview bearbeiten, Broschüre gestalten und setzen“. „Adressliste, Masterthesis zum Thema nachhaltige Gebäude“ (3x). „Video Postproduktion, Internetrecherche“. „Broschüre+Werbeplakat für Konzert, Konzert organisiert, Kundenemails beantwortet, Abiballkarten gestaltet“. „Vorbereitung zu Programmierparadigmen Prüfung“. „Infografik“ (3x). „Layout“. „Gestaltung und Programmierung, dazu gehörte das Erlernen einer Skriptsprache“. „Videobearbeitung, Internet. Ubuntu installiert, Treiberupdates, Bilder gesichtet, sortiert und hochgeladen“. „Neuen Server initialisiert und Dienste konfiguriert“. „Vorbereitungen für mein Portfolio getroffen: Bilder bearbeitet, recherchiert, skizziert, Entwürfe am PC vorgenommen“. „Hauptsächlich am PC gearbeitet“. „Postproduction eines Konzertvideos, Bildbearbeitung, Verbesserung/Optimierung des persönlichen Zeitmanagements“. „Website erstellt für ein Konzert“. „Als erstes wollte ich eigene Umgebung am PC machen, leider klappte es nicht, weil keine Verbindung über ssh aufbauen konnte“. „Über Teamviewer paar Benutzern geholfen“. „Debian Server administriert“.*

4.6.3 Zusammenhang zwischen Tätigkeit und subjektivem Gefallen der Lichtszenarien

Ausgehend von der Forschungsfrage

➔ Existieren unterschiedliche Effekte bezüglich der Art der Tätigkeit?

können folgende Hypothesen formuliert werden:

Hypothese H0: Es besteht kein Zusammenhang zwischen Tätigkeit und subjektiven Gefallen der Lichtszenarien. Die Abweichungen zwischen den Lichtszenarien liegen unterhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$ und können auf natürliche Fluktuationen zurückgeführt werden.

Hypothese H1: Es besteht ein Zusammenhang zwischen Tätigkeit und subjektiven Gefallen der Lichtszenarien. Die Abweichungen zwischen den Lichtszenarien liegen oberhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha = 0,05$. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden.

Zur Überprüfung der Hypothese wurden die Teilnehmer nach jedem Testtag gefragt, wie ihnen das Licht gefallen hat („Wie hat Ihnen das Licht heute gefallen?“ Antwort auf einer visuellen Analogskala (VAS): 1 = „gefällt gar nicht“, 100 = „gefällt sehr“ (Rehberg 2006)). Die Auswertung der Daten der VAS zum subjektiven Gefallen der Lichtszenarien ergeben zunächst keine nachweisbaren Unterschiede zwischen statischem Licht und den Dynamiken ($p > 0,37$). Es kann weder eine Korrelation von Wochentag und Gefallen des Lichts ($p_s = 0,008$) noch eine Korrelation von Reihenfolge der

Lichtbedingung und Gefallen des Lichts festgestellt werden ($\rho_s = -0,26$) (Abbildung 30). Betrachtet man nur die Korrelation von Wochentag und HD, so zeigt sich, dass von Montag bis Freitag das Gefallen zunimmt ($\rho_s = 0,69$) und bei S das Gefallen abnimmt ($\rho_s = 0,61$). Bei LD besteht keine Korrelation ($\rho_s = 0,23$). Möglicherweise ist die Korrelation bei HD und S auf die Art der Tätigkeiten entsprechend der Hypothese H1 zurückzuführen, da montags überwiegend hochkonzentrierte mentale Arbeiten durchgeführt wurden, wohingegen freitags sehr viele Grafik- und Layout-Arbeiten durchgeführt wurden.

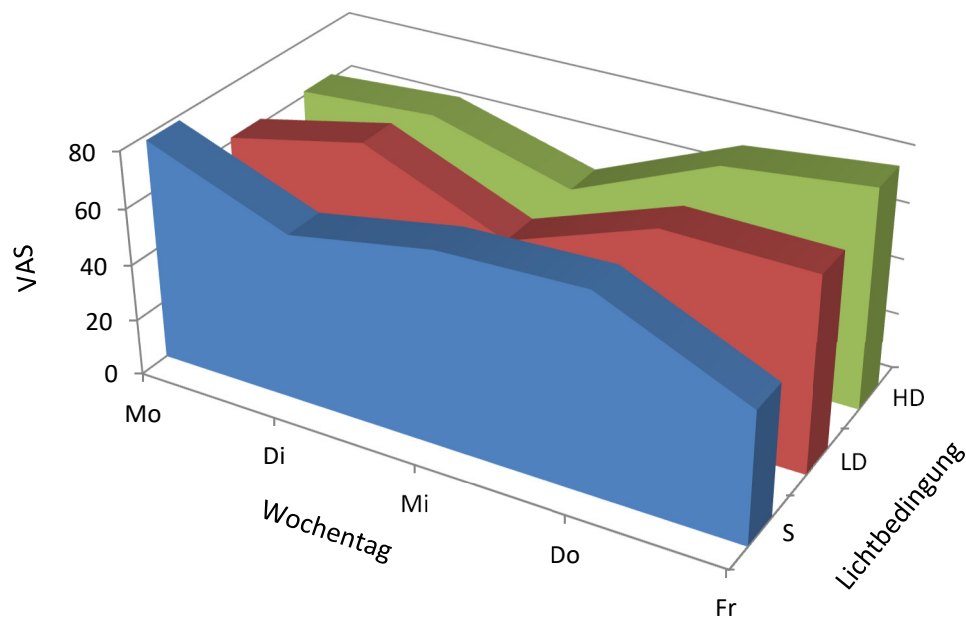


ABBILDUNG 30: ERGEBNISSE DER VAS: KEINE KORRELATION VON WOCHENTAG ODER LICHTBEDINGUNG AUF DAS GEFALEN DES LICHTS

Unterscheidet man also nach Art der durchgeführten Tätigkeiten, wird folgender Unterschied erkennbar:

Teilnehmer, die kreative (bzw. signalisatorisch-motorische) Wissensarbeit geleistet haben (Grafikdesign, Konstruktion, Videobearbeitung, Berichte schreiben), gefällt subjektiv die schnelle Dynamik (HD) signifikant besser als das statische Licht (S) (Abbildung 31). Eine ANOVA zeigte höchst signifikante Unterschiede zwischen mindestens einem Paar der Durchgänge ($p = 0,003$). Die Ergebnisse sehen wie folgt aus: \bar{x} statisches Licht (S) = 61, \bar{x} langsame Dynamik (LD) = 76, \bar{x} schnelle Dynamik (HD) = 86. Der Post-Hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur ergab einen signifikanten Unterschied zwischen S und HD ($p = 0,002$). Weder zwischen S und LD noch zwischen LD und HD besteht ein signifikanter Unterschied ($p = 0,09$ und $p = 0,33$). Die Korrelation zwischen der Lichtbedingung und dem subjektiven Gefallen beträgt $\rho_s = 0,62$.

Die Hypothese, dass ein Zusammenhang zwischen der Tätigkeit und dem subjektiven Gefallen der Lichtszenarien existiert, konnte bei kreativen Tätigkeiten bestätigt werden. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden.

Die ANOVA zum Vergleich der drei Lichtbedingungen bei den Probanden, die für eine Prüfung gelernt haben, zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen beim subjektiven Gefallen. Abbildung 32 ist zu entnehmen, dass den Probanden S tendenziell am besten gefällt, dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant ($p = 0,33$). Möglicherweise kann bei Arbeiten, die eine hohe Konzentration erfordern, dynamisches Licht zur Ablenkung führen und somit subjektiv weniger gefallen.

Zu der am Ende gestellten Frage: „Welches Licht hat Ihnen am besten gefallen?“ können keine signifikanten Unterschiede ausgemacht werden. 11 Personen gefällt das statische Licht am besten, 11 Personen gefällt die schnelle Dynamik am besten, 8 Personen gefällt die langsame Dynamik am besten.

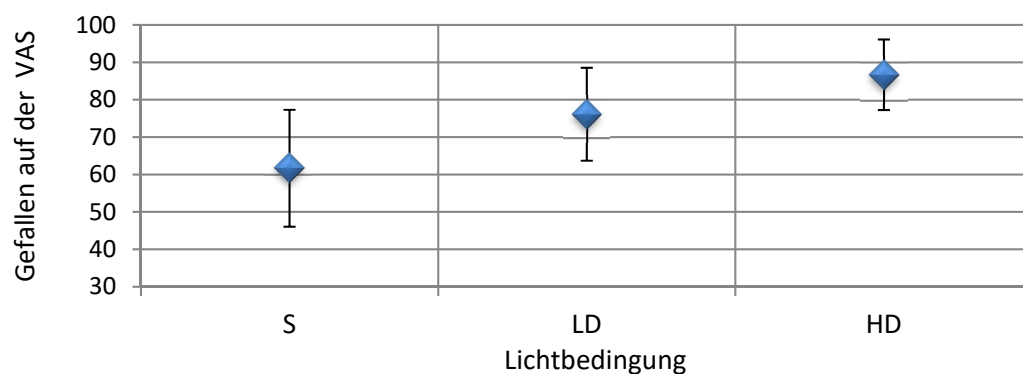


ABBILDUNG 31: ERGEBNISSE DER VAS BEI KREATIVER ARBEIT: HD GEFÄLLT AM BESTEN ($P = 0,002$)

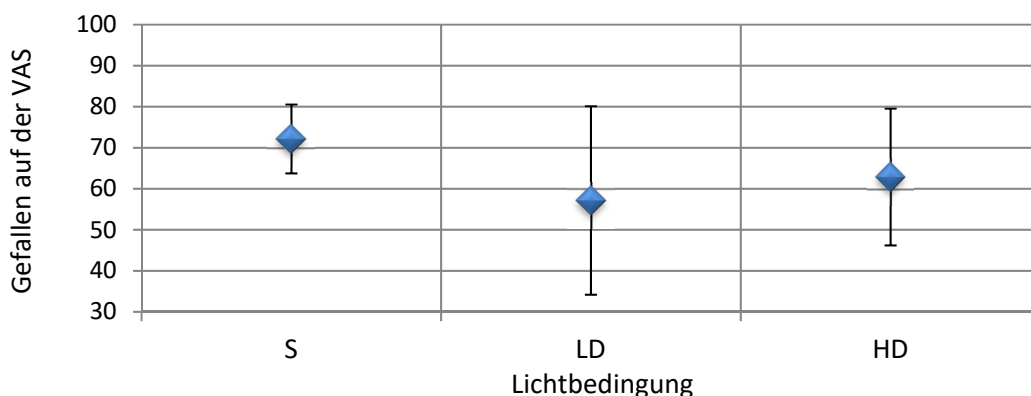


ABBILDUNG 32: ERGEBNISSE DER VAS BEI KONZENTRIERTER ARBEIT: DAS STATISCHE LICHT GEFÄLLT TENDENZIELL (N.S.) AM BESTEN

4.6.4 Tagesverlauf der subjektiven Einschätzung des Befindens

Das momentane Befinden wurde 7x pro Tag mit dem BFS (Abele-Brehm und Brehm 1986) abgefragt. Tendenziell nimmt wie zu erwarten von morgens bis abends die Dimension „Aktiviertheit“ ab und die

„Energielosigkeit“ zu. Abbildung 33 zeigt einen typischen Tagesverlauf für die Aktiviertheit mit den Items „frisch“, „voller Energie“, „tatkraftig“ und für Energielosigkeit mit den Items „abgeschlafft“, „müde“, „erschöpft“, „energielos“, „lasch“, „träge“, „entkräftet“. Der Doppelpfeil im Diagramm zeigt, wie weit um 17 Uhr bei S der Abstand von Aktiviertheit und Energielosigkeit im Vergleich zu einer sehr großen Differenz um 9:00 Uhr geschrumpft ist. Dies ist vor allem bei den Items „frisch“, „voller Energie“, „müde“ und „energielos“ zu erkennen. Im Gegensatz dazu schrumpft dieser Abstand bei HD zum Tagesende nicht so stark (Abbildung 34). Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der Fehlerbalken nur für ein Item der Befindlichkeiten (tatkraftig) dargestellt. Die anderen Fehlerbalken sind in etwa ähnlich groß. Zwischen den Befindlichkeiten bestehen keine statistisch signifikanten Unterschiede, nur die soeben erwähnte Tendenz am Ende des Tages. Es ist zu berücksichtigen, dass um 9:00 Uhr die jeweilige Lichtbedingung bereits für fünf Minuten gewirkt hat.

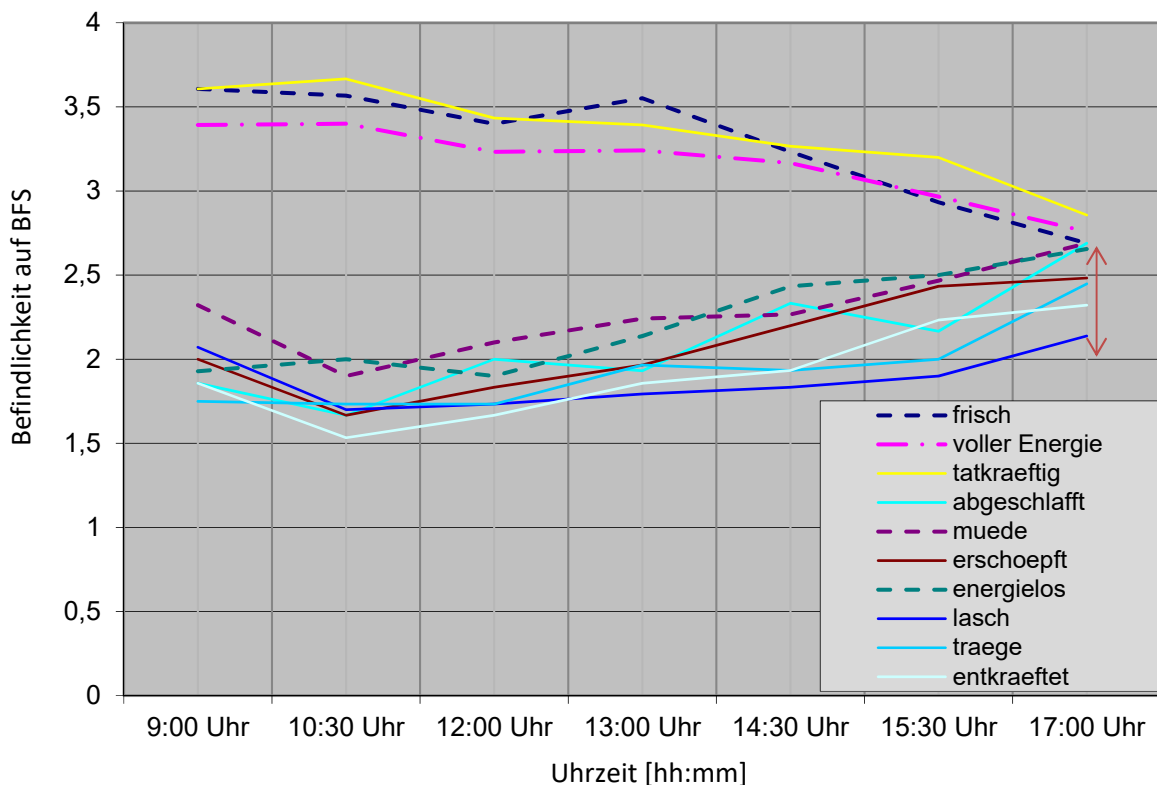


ABBILDUNG 33: TAGESVERLAUF DER BEFINDLICHKEITEN BEI S

Die stärksten Veränderungen von Befindlichkeiten sind bei den Items „voller Energie“ und „energielos“ sowie „frisch“ und „abgeschlafft“ zu sehen. Es ist zu vermuten, dass die anderen Befindlichkeiten wie „lasch“, „träge“ etc. schwieriger als Gefühl zu identifizieren sind und daher weniger starke Effekte gemessen wurden. Daher werden im Folgenden nur diese Items für die drei Lichtbedingungen grafisch gegenübergestellt. Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen jeweils HD als durchgängige Linie, LD als strichpunktierte Linie und S als gestrichelte Linie. Abbildung 35 zeigt zusätzlich noch die Fehlerindikatoren. Am Ende des Tages um 17 Uhr ist unter dem statischen Licht die Befindlichkeit

„abgeschlafft“ am größten: $S = 2,69$, für die schnelle Dynamik hingegen am geringsten: $HD = 2,2$. Dieser Unterschied ist gering aber signifikant: $p = 0,01$. Für die Befindlichkeit „frisch“ verhält es sich umgekehrt: dynamisches Licht hält tendenziell am stärksten frisch: $HD = 2,97$, statisches Licht am wenigsten frisch: $S = 2,69$. Dieser Unterschied ist aber gering und nicht signifikant: $p = 0,06$. Bei „frisch“ ist der Verlauf unter den drei Lichtbedingungen weitestgehend synchron. Bei „abgeschlafft“ gibt es zwischen S und HD ab 12:00 Uhr zu jedem Messzeitpunkt eine gegenläufige Bewegung, wobei die Abgeschlafftheit von HD jeweils nur auf das Maß von S steigt, aber, abgesehen zum Messzeitpunkt um 15:30 Uhr, nicht darüber hinausgeht. Dies deutet darauf hin, dass dynamisches Licht zwar kurzfristig (jeweils ca. 1,5 Stunden) die Abgeschlafftheit reduzieren kann, aber nicht über die Dauer eines ganzen Tages.

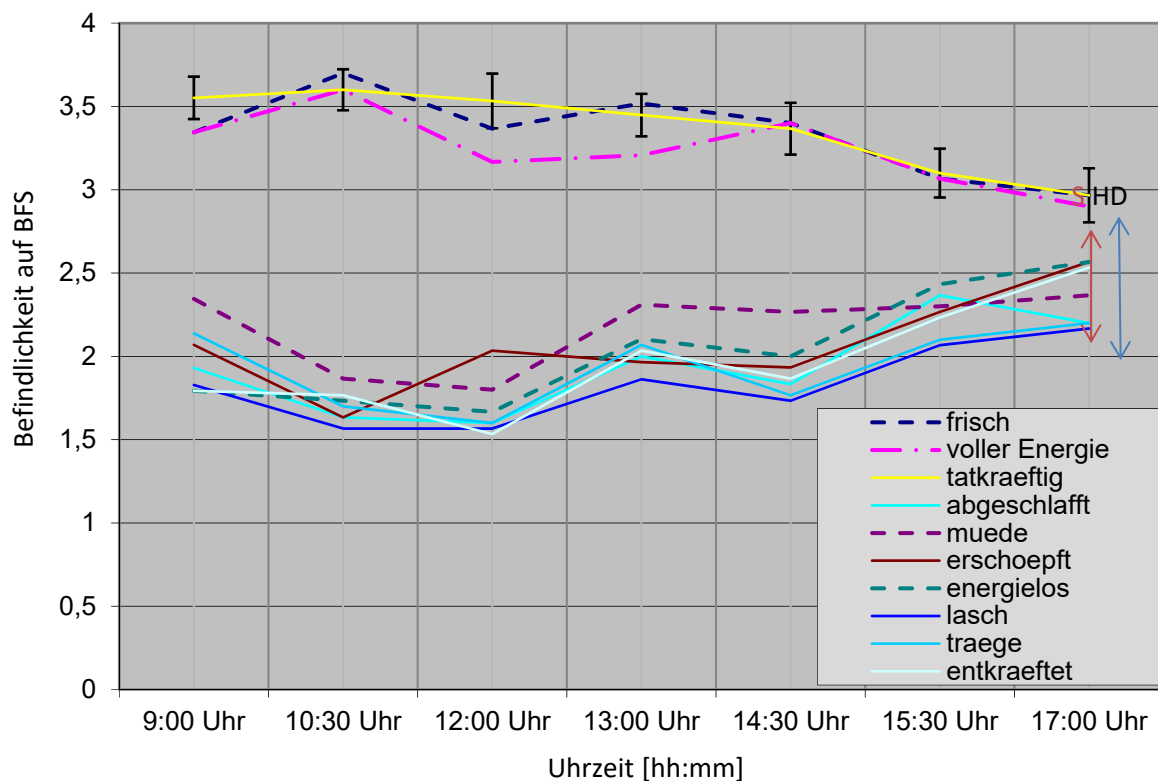


ABBILDUNG 34: TAGESVERLAUF DER BEFINDLICHKEITEN BEI HD

Beim Vergleich zwischen den Befindlichkeiten „voller Energie“ und „energielos“ (Abbildung 36) verhält es sich ähnlich, allerdings ohne statistische Signifikanz. In der Grafik ist jedoch ebenfalls eine Tendenz von größerem Müdigkeitsempfinden am Tagesende bei statischem Licht auszumachen (gestrichelte Linien). Die Befindlichkeiten schwanken bei dynamischem Licht ebenfalls stärker. Eine Korrelation nach Pearson ergibt die Tendenz ($p = 0,091$), dass die Befindlichkeit „frisch“ bei dynamischem Licht stärker schwankt als bei statischem Licht.

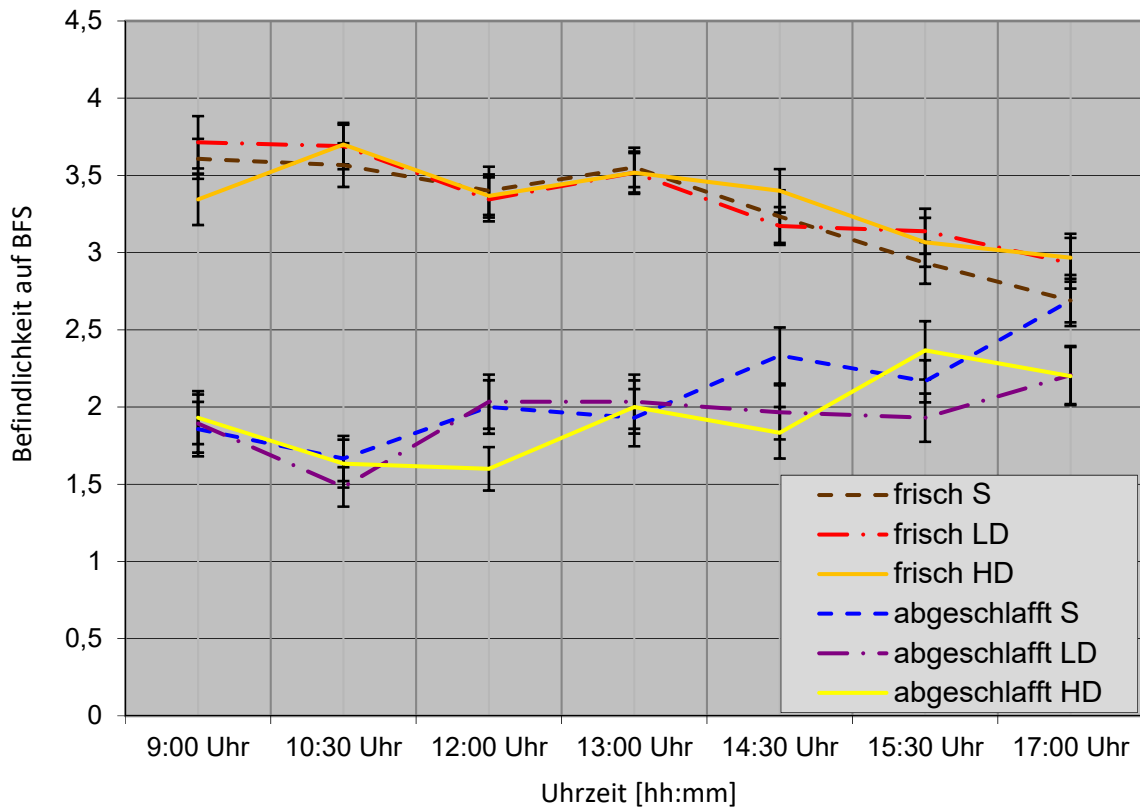


ABBILDUNG 35: TENDENZIELL GRÖßTE MÜDIGKEIT UND GERINGSTE WACHHEIT BEI S (GESTRICHELTE LINIEN) AM ENDE DES TAGES.

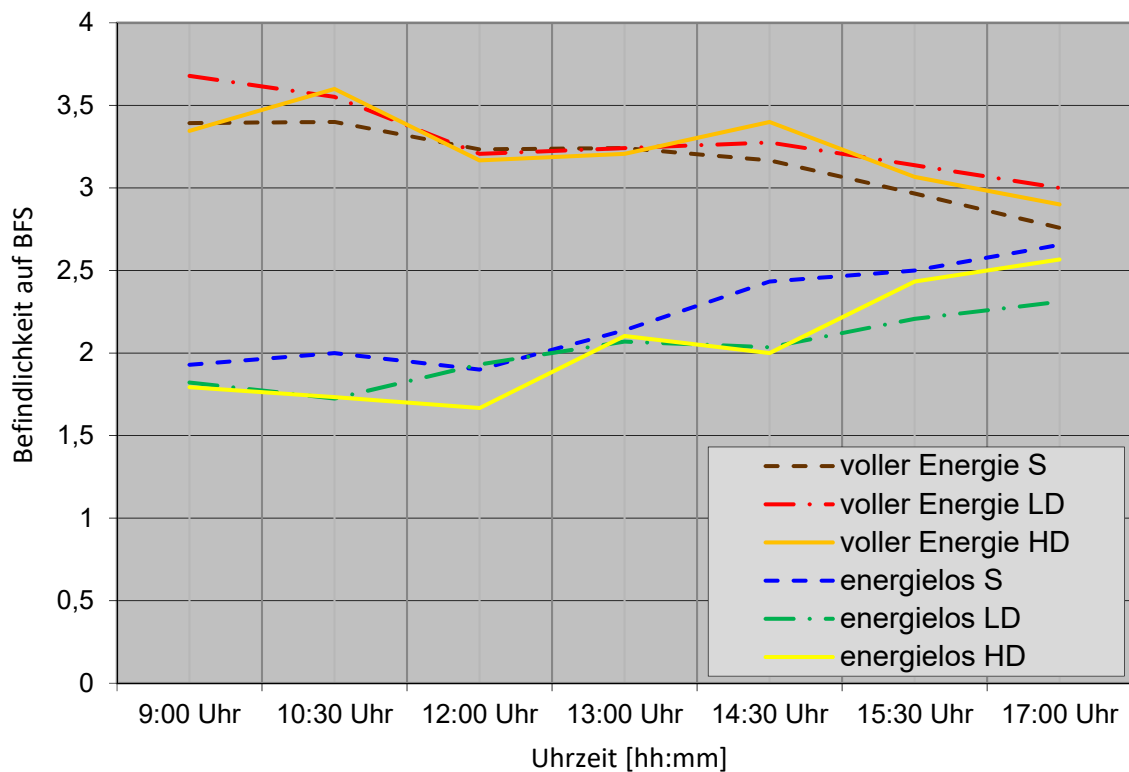


ABBILDUNG 36: VERGLEICH DER BEFINDLICHKEITEN „VOLLER ENERGIE“ UND „ENERGIELOS“ DER DREI LICHTBEDINGUNGEN

Berechnet man die Dimension „aktiviert“ (frisch, voller Energie etc.) und „Energierlosigkeit“ (müde, energielos, abgeschlafft etc.), also die Summe der einzelnen Befindlichkeiten, so ergibt sich nur am

Abend um 17:00 Uhr ein signifikanter Unterschied bei der Aktiviertheit $HD = 8,5$ und $S = 7,7$ ($p = 0,03$) sowie bei der Energielosigkeit $HD = 6,3$ und $S = 7,9$ ($p = 0,03$). Bei dynamischem Licht waren also die Teilnehmer um 17:00 Uhr aktiver und litten unter weniger Energielosigkeit als unter statischem Licht (Abbildung 37).

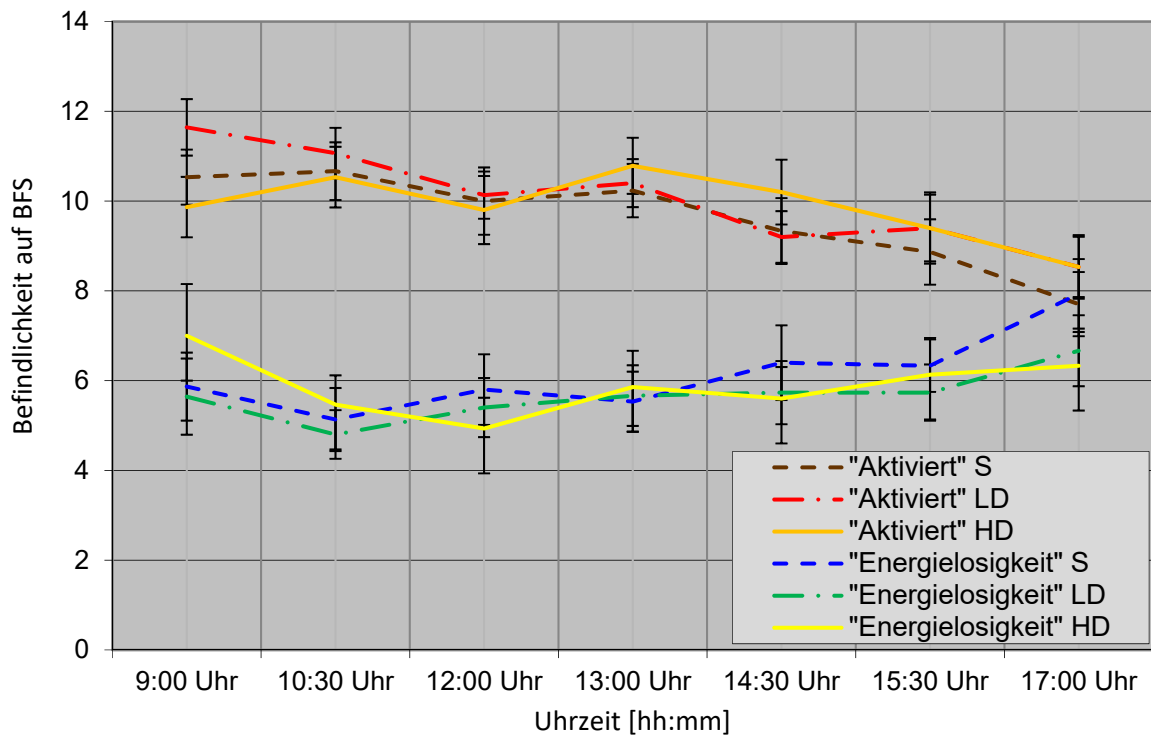


ABBILDUNG 37: DIMENSION AKTIVIERTHEIT UND ENERGIELOSSIGKEIT (SUMME VON BEFINDLICHKEITEN) FÜR DIE DREI LICHTBEDINGUNGEN

4.6.5 Subjektives Befinden am Abend

Die stärksten Effekte auf das Befinden sind nach sieben Stunden Lichteinwirkung auf die Probanden zu erwarten. Die Ergebnisse aller subjektiven Befindlichkeiten (einzelne Items der BFS) der Teilnehmer bei den drei Lichtbedingungen um 17:00 Uhr sind in Abbildung 38 gegenübergestellt. Die daraus ausgewählten signifikanten Unterschiede zwischen statischem Licht (S) und animiertem Wolkenhimmel (HD) sowie das Ergebnis von t-tests (gepaarter Student'scher t-Test) zeigt Tabelle 9.

TABELLE 9: SIGNIFIKANTE UNTERSCHIEDE DER BEFINDLICHKEITEN ZWISCHEN S UND HD

	S	HD	p
ruhelos	2,2	1,9	0,04
unbeschwert	3,1	3,5	0,01
abgeschlafte	2,7	2,2	0,01
ausgezeichnet	2,7	3,3	0,003

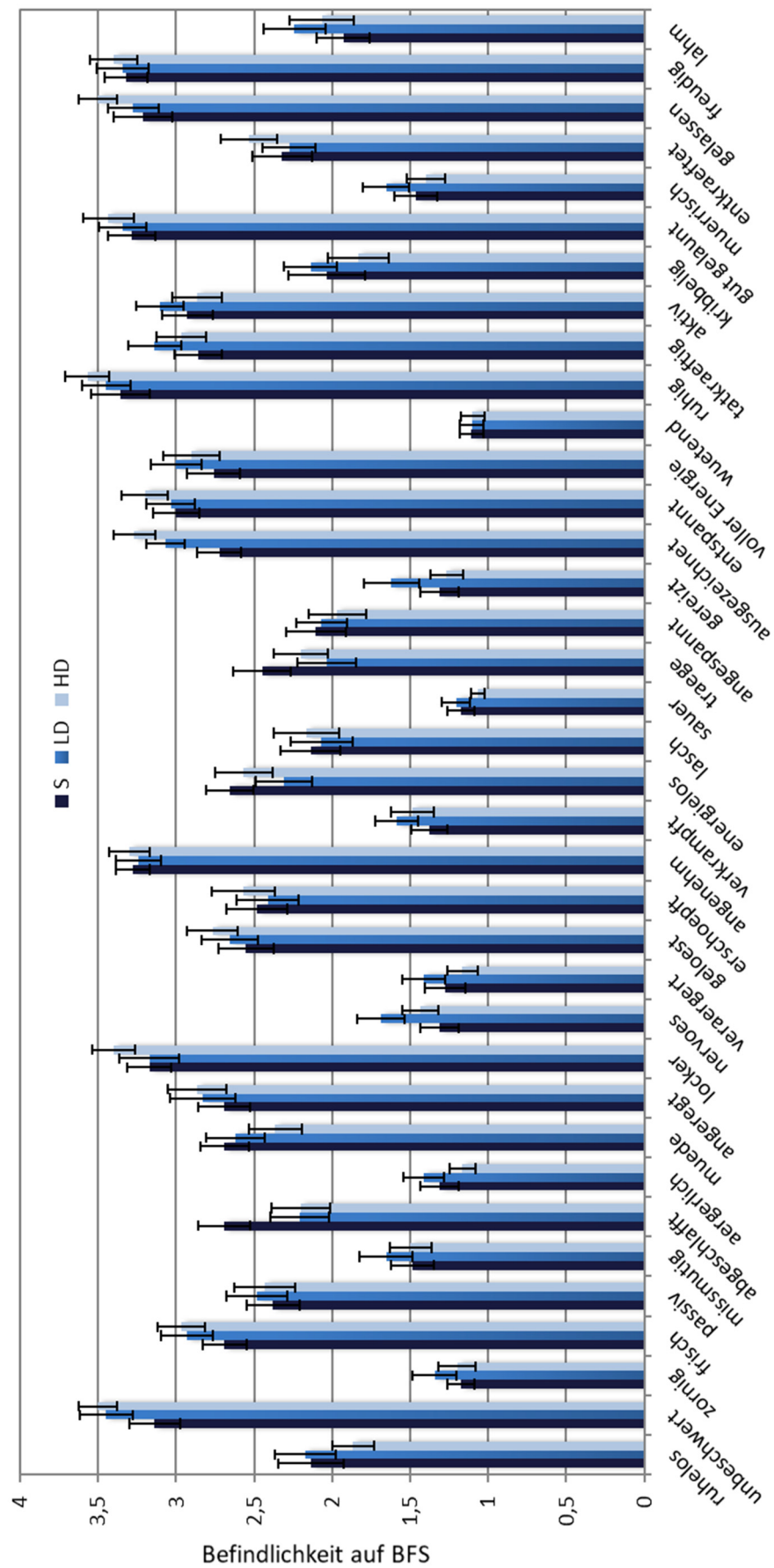


ABBILDUNG 38: BEFINDLICHKEITEN UM 17:00 UHR NACH SIEBEN STUNDEN VERSUCHSDAUER

4.6.6 Veränderung der subjektiven Einschätzung des Befindens

Die Veränderung der Dimension „gehobene Stimmung“ zwischen morgens und abends ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Nulllinie kennzeichnet ein unverändertes subjektives Befinden. Eine Abnahme der gehobenen Stimmung ist durch einen Balken im negativen Bereich unterhalb der Nulllinie gekennzeichnet. Bei allen Lichtszenarien nimmt im Tagesverlauf, wie auch Fleischer (Fleischer 2001) schon unter anderen Lichtbedingungen festgestellt hat, die gehobene Stimmung ab. Die gehobene Stimmung nimmt bei S zwar signifikant stärker ab als bei HD ($p = 0,001$), die Unterschiede sind aber gering: 2,2 bei einem Wertebereich von 1 - 50.

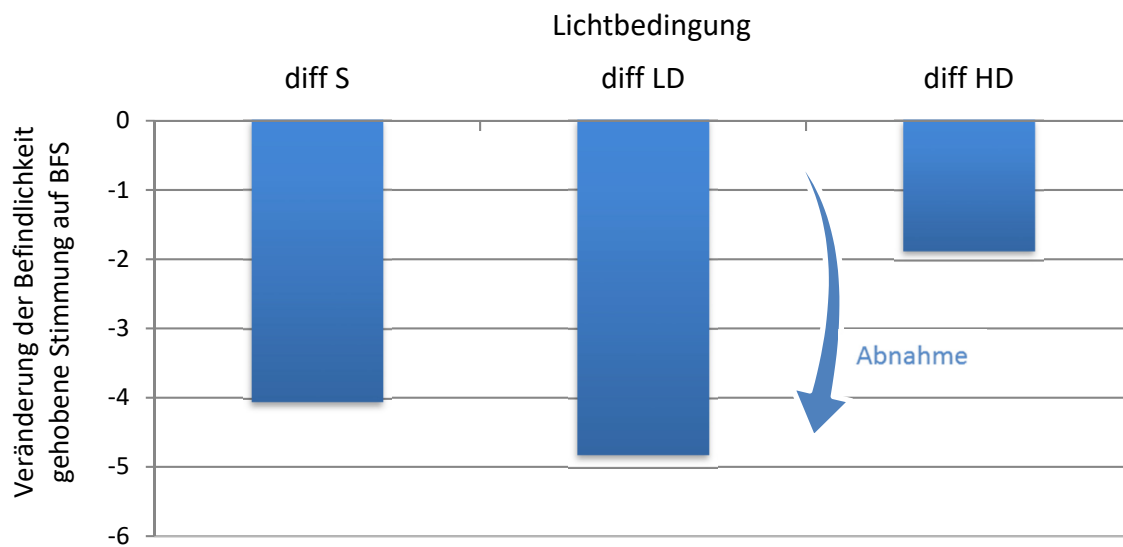


ABBILDUNG 39: ABNAHME DER BEFINDLICKEITSDIMENSION GEHOBENE STIMMUNG VON MORGENS BIS ABENDS, BEI HD NIMMT DIE GEHOBENE STIMMUNG AM WENIGSTEN AB

4.6.7 Subjektive Müdigkeit am Abend

Um 17:00 Uhr am Ende des Experiments wurden die Teilnehmer gefragt, wie müde sie auf der KSS sind. Bei statischem Licht (S) bewerten sich die Probanden auf der KSS tendenziell müder als bei schneller Dynamik (HD): S = 4,4, HD = 4,1. Der Unterschied ist jedoch minimal und nicht signifikant ($p = 0,07$). Zwischen statischem Licht und langsamer Dynamik gibt es keine Unterschiede ($p = 0,31$) (Abbildung 40).

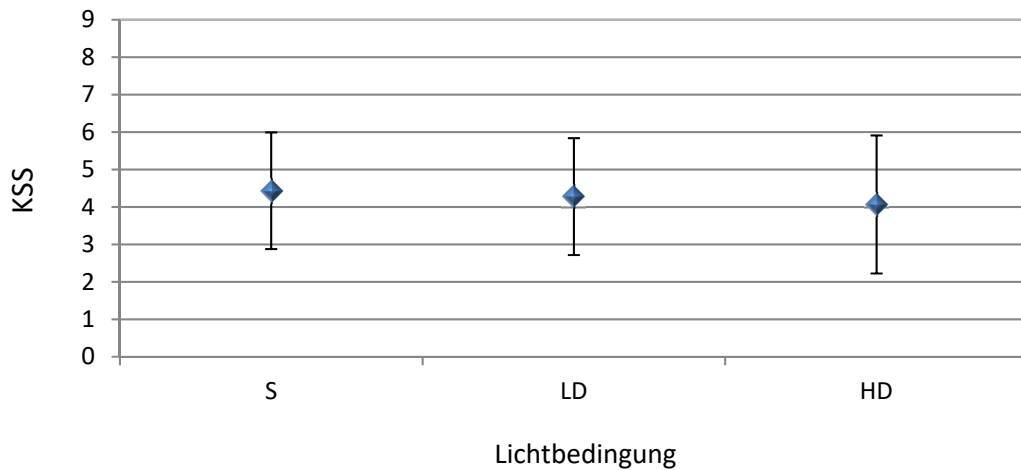


ABBILDUNG 40: MÜDIGKEIT UM 17:00 UHR AUF DER KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE

4.6.8 Veränderung der subjektiven Befindlichkeiten „Aktiviertheit“ und „Energielosigkeit“

Neben der KSS sind auch die Befindlichkeiten bzgl. der Dimensionen „Aktiviertheit“ und „Energielosigkeit“ ausgewertet. Hier zeigen sich eine Abnahme der Aktiviertheit und eine Zunahme der Energielosigkeit zwischen 9:00 Uhr und 17:00 Uhr. Statistisch signifikant ist dabei nur der Unterschied zwischen S und HD ($p = 0,01$): Unter dynamischem Licht nimmt die Aktiviertheit nicht so stark ab wie bei statischem Licht (Abbildung 41). Die waagerechte Nulllinie kennzeichnet das Fehlen einer Veränderung zwischen morgens und abends. Liegen die Balken darüber, nehmen die Befindlichkeiten zu, liegen die Balken darunter, nehmen die Befindlichkeiten ab.

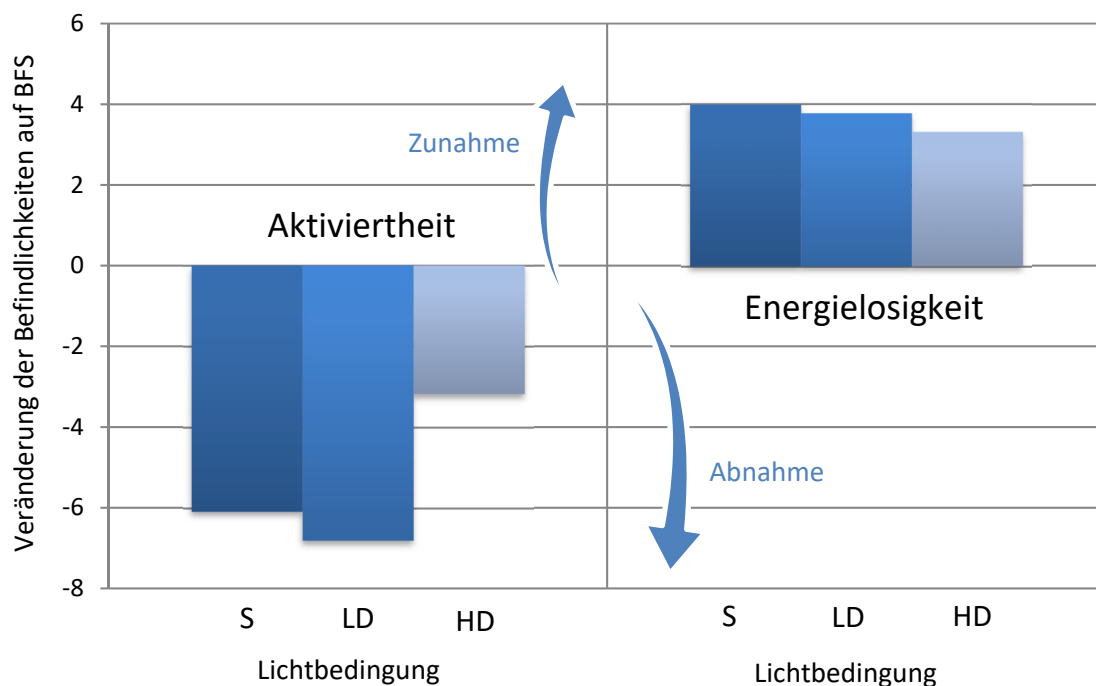


ABBILDUNG 41: AB- BZW. ZUNAHME DER DIMENSIONEN AKTIVIERTHEIT UND ENERGIELOSIGKEIT

4.6.9 Ergebnisse der offenen Fragen

Am Ende jedes Versuchs wurden den Probanden noch offene Fragen zur Beleuchtung gestellt, um Stärken und Schwächen der jeweiligen Beleuchtung aufzudecken und daraus optimierte Lichtdynamiken abzuleiten. Im Folgenden sind die Zitate der Versuchsteilnehmer zusammengefasst.

Statische Beleuchtung (S)

Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?

„Angenehme Atmosphäre/Lichtstimmung/Lichtqualität“ (5x). „Die Beleuchtung ist gleichmäßig über den Raum verteilt“ (6x). „Es war sehr hell am Arbeitsplatz“ (10x). „Die Augen tun nicht weh“. „Nicht zu grell“ (2x). „Ruhig, kaum auffallend“ (3x). „Angenehme Leuchtkraft, reizt die Augen nicht“. „Ist nicht aufdringlich wie gewohnt, ich persönlich mag das warme Licht“. „Farbtemperatur“ (6x). „Nicht künstlich“. „Bilde mir ein, man ist so „frischer“ als bei herkömmlichem Bürolicht“. „Dass das Licht nicht wechselt“ (2x). „Helligkeit war angenehm evtl. wegen Bewölkung“. „Dass das Licht immer hell war“. „Wirkte entspannender als z. B. Neonröhren; gleichmäßiger als normale Beleuchtung“. „Hat mich subjektiv wacher gehalten als üblich bei der Arbeit“ (3x). „Ausleuchtung unabhängig von Sonneneinstrahlung“. „Kein Blenden“. „Man hat alles (Texte, Bilder) gut erkennen können und anfangs war es sehr angenehm“. „Wirkt wie Tageslicht“. „Helligkeit trotz bewölktem Himmel“.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

„Wenn man an die Decke schaut, kann es einen blenden“. „Lichtpunkte“. „Zu dunkel (2x)“. „Keine Veränderung in Intensität & Farbe“ (4x). „Unter diesem Licht kann ich am PC nicht lange arbeiten“. „Alles hat gefallen“. „Zu kalte Lichtfarbe“ (4x). „Erinnerung an Arztzimmer“. „Der leichte Neon-Touch war anfangs befremdend und gegen Ende auch sehr anstrengend durch den Grün-Stich“. „Ich fühle mich erschöpft, kann aber auch am Lernen liegen“. „Zum Schluss hatte ich das Gefühl, dass ich meine Augen stark anstrengen muss, ich bin ziemlich müde geworden“ (2x). „Auf Dauer ein Tick zu hell“. „Es fehlen diese Aufweckmomente!“. „Ziemlich steril“ (2x). „In dem Setting fehlt das Tageslicht (Arbeitsplatz hinter der Wand)“.

Fazit Statische Beleuchtung:

Die hohe Beleuchtungsstärke (945 lx) ist 10 Teilnehmer besonders positiv aufgefallen. Gefallen hat auch die Farbtemperatur (6250 K), die gleichmäßige Ausleuchtung und die allgemeine Lichtstimmung. Teilnehmer, die schon eine Dynamik kennen, vermissen diese.

Langsame dynamische Beleuchtung (LD)

Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?

„Das gelbe Licht“. „Die Änderungen der Lichtintensität bzw. Farbe wirkt aktivierend“ (5x). „Die Arbeit wird weniger monoton, könnte schätzungsweise länger arbeiten als ohne Lichtwechsel“. „Ausleuchtung des Raumes“ (3x). „Angenehme Helligkeit“ (5x). „Die verschiedenen Farben verschaffen ein angenehmes Raumklima“. „Es blendet nicht“. „Je nach Farbstimmung sehr gut“. „Bei dem Licht hat man nicht das Gefühl drinnen zu sein“. „Es wirkt heller“. „Nicht blendend“. „Obwohl am ganzen Tag dieselbe Aufgabe bearbeitet wurde, empfand ich bei den Lichtwechseln ein wenig Abwechslung“. „Angenehmer Wechsel von Farben“ (4x). „Wirkt beruhigend“. „Blaues Licht“. „Der Wechsel der Helligkeit“ (2x). „Angenehmes, warmes Licht“ (2x). „Wechsel verdeutlicht Pause“. „Intensives und helles Licht hat besonders bei der Arbeit geholfen“. „Die Wechsel sind mir nicht aufgefallen“. „Kaum Unterschied zum Tageslicht“. „Langsame Wechsel“. „Ich konnte konzentriert arbeiten“. „Das Licht kam mir sehr neutral und nicht wirklich kalt oder warm vor, also sehr angenehm“. „Das Licht war heute sehr unauffällig und angenehm“. „Wenn das warme Pausenlicht ausging und das Arbeitslicht anging“. „Auch harte Übergänge sind gelegentlich sehr belebend“. „Das es mindestens eine Veränderung gibt, also nicht so langweilig wie beim statischen Licht wird“.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

„Der Lichtwechsel erfolgt zu schnell“ (5x). „Ein angenehmer „Wachrüttel-effekt“ wäre durchaus gut“. „Die Übergänge waren für die Augen anstrengend“ (3x). „Die Lichtwechsel“ (2x). „Allerdings nur in der Zeit des Wechsels, man musste sich erst an die „neue Umgebung“ gewöhnen“. „Diese „Gewöhnungsphase“ kann, vor allem morgens, etwas nerven. Muss aber nicht“. „Mich warf es aus der Konzentration“. „Ganz am Anfang scheint es zu künstlich zu sein, aber man gewöhnt sich schnell an das Licht und merkt dann Vorteile“. „Zu dunkel“ (3x). „Phasen, in denen das Licht besonders gedämpft war; hat müde gemacht“. „Licht während der Arbeit war mir fast zu hell“. „Das Licht, das zu dunkel oder zu hell war, hat schlechten Einfluss auf Augen gemacht“. „Immer noch der manchmal vorhandene Blaustich“. „Zu grünlich“. „Es gab dieses Mal nichts, was mich besonders stören hätte können“ (2x). „Gelbliches Licht in den Pausen und zum Ausfüllen der Fragebögen“ (2x).

Fazit langsame Dynamik (LD):

Die Lichtwechsel polarisieren die Teilnehmer. Der Wechsel wird als anregend empfunden, aber die einzelnen Übergänge (Fading) sind zu schnell und anstrengend für die Augen.

Schnelle dynamische Beleuchtung (HD)

Was hat Ihnen am Licht besonders gut gefallen?

„Man fühlt sich unter freiem Himmel“ (2x). „Die Dynamik des Lichtes lässt die Arbeit weniger monoton und abwechslungsreicher erscheinen“. „Gleichmäßige, nicht blendende super Ausleuchtung“ (3x). „Die Lichtwechsel waren weicher und nicht so abrupt wie beim anderen dynamischen Licht“. „Farb- und Helligkeitswechsel“ (11x). „Angenehm hell“ (4x). „Lichtwechsel haben sehr anregend gewirkt“ (4x). „Dass es manchmal heller wurde“ (4x), „wirkt aktivierend“ (3x). „Die gelberen warmen Phasen“ (2x). „Musste manchmal an vorbeiziehende Wolken denken“. „Es hat viele Pausen gegeben, wo man sich ausruhen konnte. Dazu gab es wunderbare Arbeitsatmosphäre, wo man viel für das Studium leisten konnte“. „Blaustich: wirkt beruhigend und trotzdem anregend. Hat mich v.a. heute Morgen aufgeweckt“. „Kein Flimmern beim Wechsel bemerkt“. „Am Monitor gab es keine Beeinflussung durch den Wechsel, Farben dort gleichbleibend“. „Kombination aus direktem und indirektem Licht“. „Besonders das blaue Licht hat mir gefallen“ (3x), „weil es besonders hell war“ (2x) „und man länger arbeiten kann“.

Was hat Ihnen am Licht gar nicht gefallen?

„Bei den Lichtwechseln hatte ich vormittags leichte Kopfschmerzen“. „Nach der Mittagspause war ich ziemlich müde und die Lichtwechsel haben mich nicht wach gehalten“. „Für die Augen war es anstrengend sich daran zu gewöhnen“ (5x). „Manchmal zu dunkel“ (6x). „Die ständigen Wechsel zu verschiedenen Farben und hell-dunkel“ (4x). „Wenn man sehr konzentriert in seine Arbeit vertieft ist, fällt das aber weniger auf“. „Der Wechsel lenkte ab von der Arbeit“ (3x). „Es war ein bisschen schwer sich zu konzentrieren, denn das Licht wechselte sich ständig“. „Gelbes Licht ist sehr unangenehm“. „Das extrem Helle in manchen Phasen“ (4x). „Die Farbe des Lichts, zu weiß, steril“. „Manchmal beim Lichtwechsel förmlich aufgeschreckt“. „Impulse von grellem Licht bzw. zu stark /heftig“ (5x). „Farbwiedergabe könnte verbessert werden, stört aber erstaunlich wenig, da Monitor selbst strahlt und nicht reflektiert“.

Fazit schnelle Dynamik (HD):

Die Lichtwechsel wurden teilweise als zu stark und zu schnell empfunden, teilweise hat es von der Arbeit ablenkt. Überwiegend gefallen den Teilnehmern aber die Lichtwechsel und sie werden als anregend empfunden, vor allem die heller werdenden Phasen werden als aktivierend empfunden. Die Dunkelphasen (580 lx) werden als zu dunkel empfunden.

4.6.10

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die eingangs gestellten Forschungsfragen

- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektive Müdigkeit am Tage reduzieren?
- ➔ Kann ultradiane örtlich dynamische Beleuchtung die subjektiven Befindlichkeiten verändern?
- ➔ Existieren unterschiedliche Effekte bezüglich der Art der Tätigkeit?
- ➔ Kann ultradiane dynamische Beleuchtung psychologisch aktivieren?

können aufgrund der Untersuchungsergebnisse wie folgt zusammenfassend beantwortet werden:

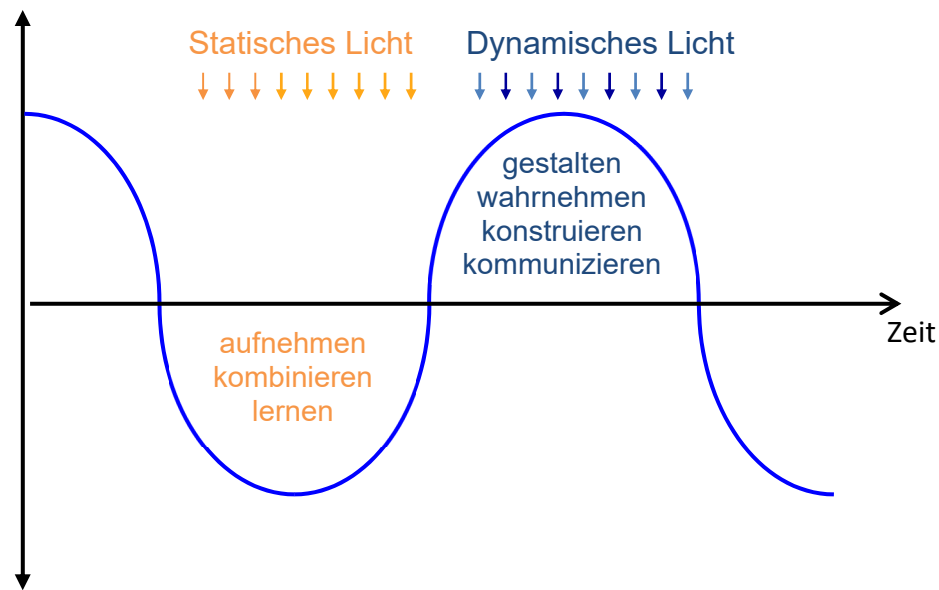
Betrachtet man die Befindlichkeiten und die Müdigkeit zu verschiedenen Tageszeitpunkten, können zunächst zwischen den Lichtszenarien keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Möglicherweise liegt die Begründung hierfür bei der bereits als sehr gut bewerteten statischen Lichtbedingung, welche durch eine zusätzliche Dynamik nur noch geringfügig verbessert werden kann. Eine andere Ursache kann die um 95 Lux verringerte Beleuchtungsstärke bei HD sein. Sie wurde aufgrund der Studien von Rimmer und Czeisler gewählt (Rimmer et al. 2000; Czeisler et al. 2001), sollte jedoch zur Verstärkung möglicher Unterschiede im nachfolgenden Experiment zu ultradianer zeitlich dynamischer Beleuchtung gleich sein. Trotz der um ca. 600 integrierten Luxstunden verringerten Beleuchtungsstärke bei HD zeichnen sich am Abend um 17:00 Uhr signifikante Unterschiede zwischen den Lichtbedingungen ab: Die BFS-Dimension „Aktiviertheit“ ist bei HD größer als bei S, wohingegen die Dimension „Energielosigkeit“ bei S größer ist als bei HD. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Items der BFS finden sich bei „ruhelos, unbeschwert, abgeschlafft und ausgezeichnet“ jeweils signifikante Unterschiede (Tabelle 9). Im Vergleich zu statischem Licht sind die Probanden bei HD *unbeschwerter* und fühlen sich *ausgezeichneter*, bei S fühlen sie sich *ruhelooser* und *abgeschlaffter*. Die Unterschiede sind jedoch klein und treten erst nach sieben Stunden Lichteinwirkung auf. Dynamisches Licht wirkt unter den untersuchten Umständen folglich erst nach mehreren Stunden. Die festgestellte stärkere Schwankung der Befindlichkeiten bei HD, welche auch auf eine kurzfristige Wirkung dynamischen Lichts hindeuteten, sind möglicherweise durch zwei simultane Wirkungsmechanismen zu begründen: kurzfristige, stärkere Stimmungsschwankungen bei dynamischem Licht, welche sich kurzfristig auch wieder ausgleichen, und langfristige, nachhaltige Veränderungen der Befindlichkeiten. Diese nachhaltigen Veränderungen sind am deutlichsten beim Vergleich der subjektiven Befindlichkeiten zwischen morgens und abends zu erkennen: Die schnelle Dynamik (HD) wirkt im Laufe eines Arbeitstages der Ermüdung entgegen und das subjektive Wohlbefinden nimmt bei der Wolkensimulation (HD) nicht so stark ab wie bei statischem Licht. Die Unterschiede sind signifikant, aber ebenfalls klein. Die Antworten zu den offenen Fragen unterstützen jedoch die Ergebnisse der

deskriptiven Statistik und zeigen einen weiteren Aspekt auf: Acht der Teilnehmer (27%) erwähnen, dass sie sich durch das heller werdende Licht aktiviert fühlen. Wenn das Licht aber dunkler wird, empfinden die Probanden es als unangenehm. Diesen vornehmlich psychologischen Effekt bei heller werdendem Licht könnte man für eine Aktivierung verwenden, wenn eine Melatoninunterdrückung nicht erwünscht ist (z. B. bei der Nachtschicht).

Differentielle Effekte bezüglich der Art der Tätigkeit wurden in dieser Studie durch Befragung nach dem subjektiven Gefallen der verschiedenen Lichtszenarien bei unterschiedlichen Tätigkeiten untersucht. Bei kreativen Tätigkeiten werden die ständigen wahrnehmbaren Lichtveränderungen mit Farbtemperatur und Helligkeitswechsel, wie sie im Experiment durch eine Wolkensimulation erzeugt wurden, auf der VAS mit besserem Gefallen bewertet als statisches Licht. Häufige Wechsel der Beleuchtungsstärke wie bei der Wolkensimulation werden auch bei den offenen Fragen überwiegend positiv bewertet, nur bei konzentrierter Arbeit wirken sie eher störend. Der Zusammenhang zwischen der Tätigkeit und dem subjektiven Gefallen der Lichtszenarien, welcher eingangs in einer Hypothese formuliert wurde, konnte bestätigt werden. Die Nullhypothese kann abgelehnt werden.

Da die schnelle Dynamik bei konzentrierter Arbeit weniger Gefallen findet und nur bei kreativer Arbeit geschätzt wird, sollte man je nach Art der Tätigkeit zwischen statischem Licht und dynamischen Licht wechseln. Abbildung 42 zeigt eine mögliche Nutzung verschiedener Lichtszenarien. Möglicherweise verhält es sich bei dynamischem Licht wie mit Musik bei der Arbeit. Bei bestimmten Tätigkeiten (physikalische und kreative Tätigkeiten) kann Musik eine positive Wirkung auf die Produktivität haben (Wokoun 1968; Fox 1971; Lesiuk 2005; Lesiuk 2010). Bei konzentriertem Arbeiten ist Musik eher störend. Wie in Kapitel 1.1 erläutert, lässt sich Wissensarbeit in sensorischen Arbeit (Informationen aufnehmen), diskriminatorische Arbeit (Informationen filtern und zuordnen), kombinatorische Arbeit (entscheiden) und signalisatorischmotorische Arbeit (Handeln) untergliedern. Die diskriminatorische und kombinatorische Arbeit ist der mentalen Arbeit, die sensorisch Arbeit und die signalisatorischmotorische Arbeit der überwiegend „physikalischen“ und kreativen Arbeit zuzuordnen (Abbildung 42).

“Physikalische” und kreative Arbeit: sensorisch & signalisatorisch-motorisch



Fokussierte mentale und konzentrierte Arbeit: diskriminatorisch & kombinatorisch

ABBILDUNG 42: VORSCHLAG ZUR NUTZUNG ULTRADIANER LICHTDYNAMIK NACH ART DER TÄTIGKEIT

Die x-Achse stellt den zeitlichen Verlauf der Wissensarbeit dar. Im negativen Bereich der y-Achse sind die diskriminatorischen & kombinatorischen Arbeiten wie das Aufnehmen, Kombinieren und Lernen dargestellt. Hier ist die überwiegend fokussierte Aufmerksamkeit einzuordnen. Im positiven Bereich der y-Achse ist die sensorisch & signalisatorisch-motorische Arbeit dargestellt, zu welcher beispielsweise das Wahrnehmen, Gestalten, Konstruieren und Kommunizieren zählt. Hier ist die geteilte Aufmerksamkeit, Alamierung und die Orientierung einzuordnen. Statisches Licht ist aufgrund der Erkenntnisse dieser Studie vorwiegend für die diskriminatorische & kombinatorische Arbeit zu empfehlen. Dynamisches Licht hingegen kann bei überwiegend sensorischer & signalisatorisch-motorischer Arbeit angewendet werden. Hier kann dynamisches Licht möglicherweise nicht nur bei kreativen Arbeiten gefallen, sondern diese auch unterstützen. Ob dynamisches Licht förderlich für Kreativität und statisches Licht förderlich für Konzentration ist, muss in der folgenden Studie noch untersucht werden.

Aufgrund der Aussagen, dass sich Teilnehmer durch das heller werdende Licht aktiviert fühlten, wurde eine optimierte Dynamik mit neutralweißer Lichtstimmung ohne Wolkensimulation entwickelt, die merklich heller wurde, aber beim Abdunkeln sich so langsam verändert, dass dies nicht wahrgenommen werden kann (Abbildung 43). Durch die Isolation dieser Eigenschaft der Lichtdynamik kann möglicherweise die aktivierende Wirkung des Lichts auf einen einzelnen Einflussparameter (das heller werdende Licht) eingegrenzt werden. Mit dieser möglicherweise auf das Wesentliche reduzierten Lichtdynamik lassen sich dadurch zum einen eine wesentlich vereinfachte und dennoch

aktivierende Lichtdynamik realisieren und zum anderen im folgenden Experiment genauere Aussagen über die Ursachen der Aktivierung durch dynamisches Licht machen. In dieser weiteren Untersuchung wird außerdem die Wirkung auf die Leistung und auf objektive, nicht willentlich vom Teilnehmer beeinflussbare, physiologische Reaktionen ermittelt.

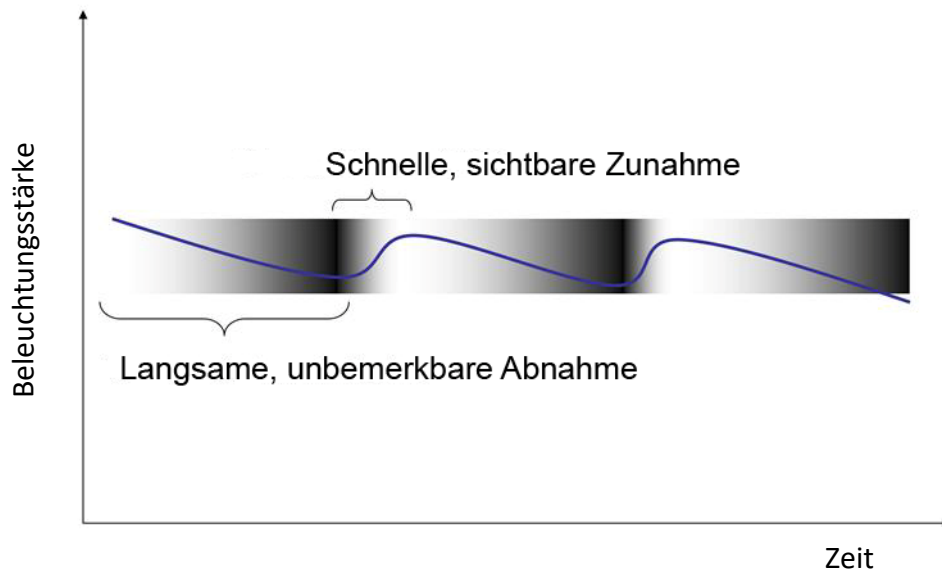


ABBILDUNG 43: OPTIMIERTE LICHTDYNAMIK ZUR AKTIVIERUNG

5. Die Wirkung ultradianer zeitlich dynamischer Beleuchtung auf Leistung und ANS

Die Ergebnisse der vorangegangenen Studie mit ultradianem Lichtwechsel durch Wolkensimulation deuten auf eine aktivierende und der Kreativität dienliche Wirkung hin. Möglicherweise wurde die Aktivierung der Teilnehmer durch die Phasen der Zunahme der Beleuchtungsstärke verursacht, da dies bei der Befragung der Probanden mehrmals erwähnt wurde. Folglich lautet eine präzisierte Forschungshypothese:

➔ Eine Zunahme der Beleuchtungsstärke verursacht eine Aktivierung beim Menschen

Eine Objektivierung der Einflüsse auf Ermüdung, kreative Leistung sowie Konzentrationsfähigkeit wird die folgende Untersuchung bereitstellen. Dieses Experiment wurde im Rahmen des Projektes OLIVE (Optimierte Lichtsysteme zur Verbesserung von Leistungsfähigkeit und Gesundheit) durchgeführt. Das Projekt ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Verbundprojekt, bei dem folgende Projektpartner beteiligt sind: ITZ Trilux GmbH, Vossloh-Schwabe GmbH, Intellux GmbH, Lichtforum NRW, Charité Berlin, Hochschule Bonn Rhein Sieg und das Fraunhofer IAO mit dem Competence Team Visual Technologies (CTVT). Das Ziel des CTVT ist unter anderem, die Wirkung dynamischer Beleuchtung zu erforschen.

Um herauszufinden, ob dynamisches Licht nicht nur bei kreativen Arbeiten bevorzugt wird, sondern auch die Kreativität fördert, kommt ein Kreativitätstest (Test zum schöpferischen Denken) zur Anwendung. Da die Probanden, die konzentriert gearbeitet haben, die statische Beleuchtung bevorzugten, soll nun mit einem Konzentrationstest (Test d2) untersucht werden, ob das statische Lichtszenario die Konzentrationsleistung verbessert, beziehungsweise ob die Konzentrationsleistung bei dynamischem Licht schlechter ist.

Zur Objektivierung der Lichtwirkung auf den Menschen wird während der Lichtszenarien die Herzfrequenz der Probanden aufgezeichnet. Sie liefert mittels der Auswertung der Herzratenvariabilität Informationen über die Aktivität des autonomen Nervensystems (ANS).

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Studien ergeben sich weitergehende Fragestellungen, die mit dieser Studie beantwortet werden sollen:

- ➔ Wie sind die Befindlichkeiten, wenn Probanden einem heller werdenden Licht ausgesetzt werden?
- ➔ Fühlen sich die Probanden wacher, wenn sie einem heller werdenden Licht ausgesetzt werden? Fühlen sie sich im Gegensatz dazu müder, wenn sie einem dunkler werdenden Szenario oder statischem Licht ausgesetzt werden?
- ➔ Fördern ultradiane dynamische Lichtszenarien die Kreativität?
- ➔ Können die Probanden während des statischen Szenarios konzentrierter arbeiten?
- ➔ Gibt es Unterschiede bei der Aktivität des vegetativen Nervensystems zwischen den verschiedenen Szenarien? Kann man durch Analyse der Herzratenvariabilität nachweisen, dass die dynamischen Szenarien mehr aktivieren als das statische?
- ➔ Wie gut gefallen den Probanden die Lichtszenarien? Gefällt ihnen das schnell heller werdende Szenario besser als das schnell dunkler werdende oder das statische Licht?

5.1 Eingesetzte Instrumente

5.1.1 Herzratenvariabilität

Die Herzratenvariabilität (HRV) kennzeichnet die Schwankung der Herzfrequenz über einen definierten Messzeitraum bei einer Analyse aufeinanderfolgender Herzperioden (Hottenrott et al. 2006). Bei einer hohen physischen oder auch psychischen Belastung ist die Sympathikusaktivität höher und damit auch die Herzfrequenz, die HRV jedoch nimmt ab. Bei niedriger Belastung oder in Ruhe mit hoher Parasympathikusaktivität ist auch die Herzfrequenz niedrig, die HRV hingegen nimmt zu. Somit

variieren bei Entspannung die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Herzschlägen stärker. Das bedeutet, dass beispielsweise bei einem Puls von 60 Schlägen pro Minute der Abstand der einzelnen Herzschläge nicht immer genau eine Sekunde ist, sondern z. B. zwischen 900 ms und 1100 ms schwankt. Gemittelt ergeben sich aber 1000 ms und somit 60 Schläge pro Minute.

Die HRV wird durch viele Faktoren beeinflusst. Dazu zählen äußere Faktoren wie z. B. die Umgebungstemperatur, Rauchen, Alkohol und sportliche Tätigkeiten. Die HRV ist auch abhängig von der Tageszeit. Während des Schlafs in der Nacht ist die Variabilität höher als tagsüber (am Tage überwiegt die Sympathikusaktivität) (Bilan et al. 2005). Sportliche Aktivität, vor allem Ausdauertraining, führt zu einer Steigerung des Einflusses des Parasympathikus, was sich in höherer HRV und niedrigerer Herzfrequenz in Ruhe zeigt (Sammito 2014). Daher wird die HRV auch häufig zur Bestimmung der Fitness von Sportlern verwendet, z. B. mit Pulsmessern der Firma Polar.

Die HRV ist ein sehr schneller Indikator, der die Veränderungen des vegetativen Nervensystems anzeigt. Während der Parasympathikus innerhalb weniger Sekunden reagiert, benötigt der Sympathikus ungefähr 30 Sekunden, bis seine Aktivität messbar wird. Änderungen der HRV, die auf die dynamische Beleuchtung zurückzuführen sind, lassen sich folglich über die jeweils acht Minuten dauernden Lichtszenarien nachweisen.

Tabelle 10 erläutert Parameter, die häufig für die Auswertung der HRV verwendeten werden.

TABELLE 10: KENNGRÖßEN, DIE BEI DER AUSWERTUNG DER HRV BERÜCKSICHTIGT WERDEN

Kenngröße	Beschreibung
RR-Wert [ms]	Der RR-Wert ist die Dauer einer elektrischen Herzaktion, meist angegeben in Millisekunden. Daraus lässt sich die Herzfrequenz (HF) ableiten: $HF [1/min] = 60/RR\text{-Wert [s]}$
meanRR [ms]	durchschnittlicher RR-Wert, je kleiner der Wert, desto höher ist die Herzfrequenz
SDRR [ms]	Standardabweichung aller RR-Werte, Indikator der Gesamtvariabilität
rMSSD [ms]	Quadratwurzel aus der Summe der Differenzen zwischen den einzelnen RR-Werten, Ausdruck vermehrter parasympathischer Aktivität, je höher der Wert, desto entspannter ist der Mensch, wird zur Abschätzung der HRV-Komponenten bei Kurzzeitmessungen verwendet.
pNN50 [%]	Prozentsatz der aufeinanderfolgenden RR-Werte, die sich um mehr als 50 ms voneinander unterscheiden (hohe spontane Änderungen). Je höher der Wert, desto größer ist der Parasympathikuseinfluss. Je geringer der Wert, desto weniger Parasympathikuseinfluss ist vorhanden.
HRV triangular index	Abschätzung der gesamten HRV, geometrische Methode, die auf Poincaré-Untersuchung basiert (Aufnahmezeit sollte mind. 20 min betragen)
LF/HF-Ratio	Verhältnis der niederfrequenten (low frequency, 0,04-0,15 Hz) zu den hochfrequenten (high frequency, 0,15-0,4 Hz) Intervallen, Normwert unter Ruhebedingungen: 1,5-2,0. Bei höheren Werten ist das sympathische Nervensystem übermäßig tätig.

Die RR-Werte wurden mit der iOS App „SelfLoops HRV“ (Apple 2016) auf einem iPod aufgezeichnet. Diese App wurde bei einem Telefonat mit Polar als sehr zuverlässig bewertet. Die Probanden trugen einen Pulsgurt von Polar (Modell H7), welcher über Bluetooth 4.0 mit der App gekoppelt war. Der H7 wurde ausgewählt, da er in zahlreichen Studien als EKG-genau validiert wurde (Giles et al. 2016), u.a. weil er mit einer Frequenz von 1000 Hz den Herzschlag präzise abtastet. SelfLoops HRV schreibt eine Textdatei mit allen RR-Werten und kann somit in Excel importiert, als CSV-Datei abgespeichert und mit dem MATLAB-Programm „Kubios HRV“ ausgewertet werden. Das Programm Kubios HRV ist ein umfangreiches Analyseprogramm zur detaillierten Ermittlung der HRV auf Basis der RR-Werte und kann auf Anfrage kostenlos verwendet werden (Kubios HRV 2016).

Zur Minimierung des Einflusses der Temperatur auf die HRV wurde die Raumtemperatur zwischen 22 und 24°C konstant gehalten. Die jeweils gleich langen Zeitbereiche für die Auswertung wurden bei allen Probanden manuell ausgewählt. Die Eingewöhnungszeit von einer Minute wurde aufgezeichnet, aber nicht ausgewertet, damit mögliche Einschwingzeiten, die die Ergebnisse verfälschen, vermieden werden. Zur Vermeidung von Artefakten durch Bewegungen der Probanden waren die Probanden angewiesen, während der Versuche nicht zu sprechen und keine großen Bewegungen auszuführen. Offensichtliche Ausreißer wurden bei der Auswertung ausgeschlossen.

5.1.2 Konzentrationstest: Test d2

Der „Test d2“ ist ein standardisierter Durchstreichtest zur Ermittlung der Aufmerksamkeits- und Konzentrationsleistung (Brickenkamp 1981). Er erfordert keine speziellen Vorkenntnisse oder Fähigkeiten und wird auf Papier ausgeführt. Im Gegensatz zu Konzentrationstests am Bildschirm kann eine Beeinflussung der Probanden durch Bildschirmlicht ausgeschlossen werden. Der geringe Zeitaufwand verbunden mit der leichten Erlernbarkeit sind weitere Gründe für seine Verwendung. Der Test besteht aus einer zufälligen Reihenfolge der Buchstaben *d* und *p* mit unterschiedlicher Anzahl an Strichen oben und unten. Die Versuchsperson hat die Aufgabe, keine anderen Zeichen als *d* mit zwei Strichen oben und unten. Die Versuchsperson hat die Aufgabe, keine anderen Zeichen als *d* mit zwei Strichen durchzustreichen. Vor der eigentlichen Testdurchführung wird das Schema mit einer separaten Übungszeile geübt. Die Instruktion erfolgte bei jedem Probanden mit folgender einheitlicher Formulierung:

„In dem Test d2 geht es darum, alle *ds* mit zwei Strichen zu markieren. Alle Striche, oben und unten zusammengezählt bei einem *d*, müssen zwei ergeben. Es dürfen keine anderen Zeichen wie *ps* oder *ds* mit mehr oder weniger Strichen markiert werden. Bitte führen Sie jetzt zuerst die Übungszeile durch. Den Test beginnen Sie bitte in der ersten Zeile oben links und arbeiten Sie so schnell und exakt wie möglich. Sie haben dafür 3 Minuten und 30 Sekunden Zeit.“

Insgesamt sind bei dem Test maximal 14 Zeilen á 47 Zeichen zu bearbeiten. In der nachstehenden Abbildung ist ein Ausschnitt des Tests abgebildet.

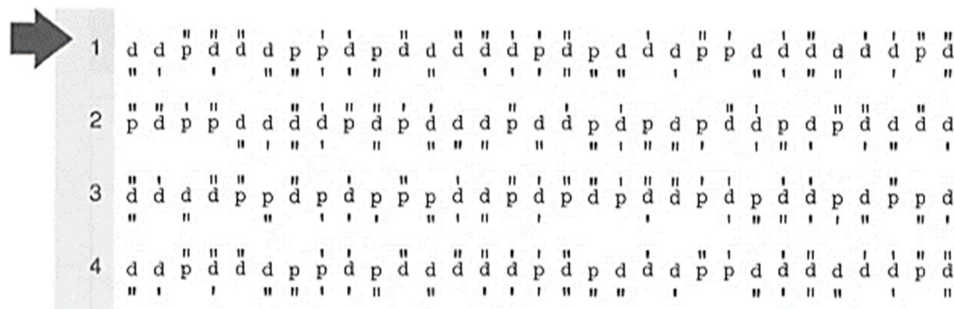


ABBILDUNG 44: AUSSCHNITT AUS DEM TESTBLATT DES TESTS D2

Für die Auswertung wird die Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen herangezogen. Der prozentuale Fehleranteil wird als Quotient aus der Anzahl der Fehler mit der Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen gebildet. Die Anzahl der Fehler ist die Summe aus falsch markierten Zeichen und ausgelassenen (richtigen) Zeichen. Der Lerneffekt wird ebenfalls bei der Auswertung berücksichtigt.

5.1.3 Kreativitätstest: TSD-Z

Zur Ermittlung der Lichtwirkung auf die Kreativität wird ein Test benötigt, welcher nicht die zeichnerischen Fähigkeiten, sondern die Kreativität im Sinne von schöpferischem Denken testet. Er soll keine Vorkenntnisse voraussetzen und von Jedermann durchführbar sein. Aus diesem Grunde wurde der „Test zum schöpferischen Denken – zeichnerisch“ (TSD-Z) von Klaus K. Urban und H. G. Jellen ausgewählt (Urban und Jellen 1985). Der Test dient zur Überprüfung des kreativen Potentials und schöpferischen Denkens. Die drei Varianten des Tests, die während der Lichtszenarien zu bearbeiten waren, sind in Abbildung 45 dargestellt.

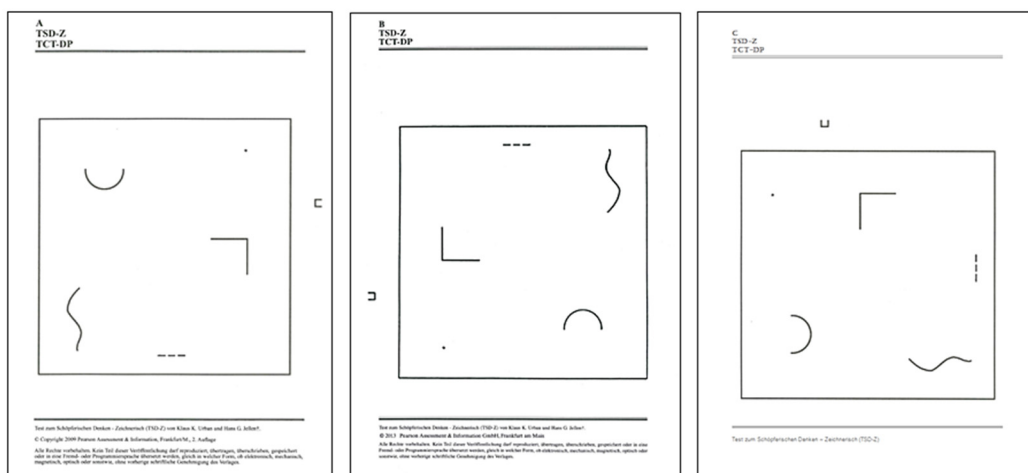


ABBILDUNG 45: VARIANTE A, B UND C DES TSD-Z

Die Originalversion des Tests beinhaltet nur Version A und B. Version C wurde für die Studie erstellt, indem das Originalmotiv (A) um 90° gedreht wurde. Die Probanden wurden gebeten, die vor ihnen liegende Zeichnung nach Belieben weiterzuführen. Die Einweisung der Probanden erfolgte immer mit der gleichen Formulierung:

„Das ist eine angefangene Zeichnung. Der Zeichner hat damit aufgehört, bevor er wusste, was daraus werden würde. Sie sollen jetzt einfach weiterzeichnen! Sie können so zeichnen, wie sie möchten. Sie können dabei nichts falsch machen; alles ist richtig. Sie haben dafür 3 Minuten und 30 Sekunden Zeit.“

Der Test zum schöpferischen Denken prüft qualitative und quantitative Aspekte. Nachfolgend sind die 14 Auswertungskategorien genannt, in der jeweils maximal sechs Punkte (in den Kategorien 10-13 maximal drei Punkte) erreicht werden können. Es können also maximal 66 Punkte erreicht werden. Die genaue Bewertung der zeichnerischen Ausführungen ist im Handbuch zum Test ausführlich beschrieben und mit Beispielzeichnungen genau erläutert.

Auswertungskategorien:

1. Weiterführung vorgegebener Fragmente
2. Ergänzungen oder Ausgestaltungen
3. Neue Elemente
4. Verbindungen, zeichnerisch
5. Verbindungen, thematisch
6. Begrenzungsüberschreitung, figurabhängig
7. Begrenzungsüberschreitung, figurunabhängig
8. Perspektive
9. Humor bzw. Affektivität/Emotionalität/expressive Kraft der Zeichnung
10. Unkonventionalität A: Manipulation des Materials
11. Unkonventionalität B: Fiktionales, abstraktes, surrealistisches Thema
12. Unkonventionalität C: Verwendung von Zeichen und/oder Symbolen
13. Unkonventionalität D: Nichtverwendung von stereotypischen Figuren
14. Zeitfaktor

5.1.4 Fragebogen zur Einschätzung der subjektiven Befindlichkeit

Einige subjektive Befindlichkeiten des BFS wie „Ärger“ und „deprimiert“ sind bei der vorangegangenen Untersuchung mit ultradianen Lichtwechseln jeweils nur sehr schwach und mit wenig Varianz zwischen den Lichtszenarien ausgeprägt. Zu diesen Befindlichkeiten zählen z. B. die Items „zornig“, „missmutig“, „ärgerlich“, „verärgert“, „sauer“ und „wütend“ (Abbildung 38). Folglich werden diese Befindlichkeiten in diesem Experiment für die Befragung vernachlässigt. Im Gegensatz zum BFS besteht der „Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen“ (MDBF) nur aus drei Kategorien ohne die oben genannten Befindlichkeiten und ist somit zur Untersuchung der Lichtwirkung effizienter. Er erfasst die bipolaren Dimensionen der aktuellen psychischen Befindlichkeit auf einer sechsstufigen Skala mit „überhaupt nicht“ bis „voll und ganz“ (Steyer et al. 1997). Zur Auswertung der Fragebögen werden die

einzelnen Adjektive zur Befindlichkeit in drei Kategorien mit jeweils positiver und negativer Ausprägung eingeteilt: Gute Stimmung (gut, glücklich, wohl, zufrieden) und schlechte Stimmung (schlecht, unglücklich, unwohl, unzufrieden), Ruhe (ausgeglichen, entspannt, gelassen, ruhig) und Unruhe (angespannt, nervös, ruhelos, unruhig), Wachheit (ausgeruht, frisch, munter, wach) und Schläfrigkeit (ermattet, müde, schläfrig, schlapp). Jeder Kategorie der positiven Ausprägungen werden Werte von 1 bis 6 (keine Zustimmung bis volle Zustimmung) zugeordnet. Die negativen Ausprägungen werden entgegengesetzt mit Werten von 6 bis 1 (keine Zustimmung bis volle Zustimmung) kodiert. Der MDBF-Score für jede Kategorie (Ruhe/Unruhe, Wachheit/Schläfrigkeit, gute/schlechte Stimmung) wird aus der Summe der einzelnen Adjektive entsprechend der Kategorie gebildet. Maximal können 48 Punkte je Kategorie erreicht werden, da die stärkste Ausprägung mit sechs Punkten bewertet wird und vier positive Adjektive sowie vier negative Adjektive in jeder der drei Kategorien abgefragt werden. Die minimale Punktzahl beträgt pro Kategorie acht Punkte (ein Punkt pro Begriff). Ein hoher Skalenwert zeigt die positive Ausprägung der Kategorie an. Für die Kategorie *Ruhe/Unruhe* bedeutet ein hoher Wert beispielsweise, dass die Probanden ruhig und entspannt sind, ein niedriger Wert hingegen, dass sie eher nervös, angespannt und aufgeregt sind.

5.2 Versuchsanordnung

Zur Vermeidung von störenden Einflüssen durch das Tageslicht und um die Versuchsbedingungen (Licht, Temperatur, Geräusche etc.) weitestgehend konstant zu halten, findet der Versuch in einem fensterlosen, klimatisierten und schallgedämmten Laborraum statt. In diesem Raum befinden sich die LED-Lichtwand für die Lichtapplikation, zwei Tische für Proband und Versuchsleiter sowie ein Computer zur Steuerung der Lichtwand. Entsprechend der Empfehlungen für Büroarbeitsplätze ist die LED-Lichtwand wie ein Fenster seitlich vom Schreibtisch mit einer Größe von 2,25 x 2,85 m (Höhe x Breite) positioniert. Der Proband sitzt in einem Abstand von 1,25 m neben der Wand, während der Versuchsleiter dem Proband schräg gegenüber sitzt, ohne einen Schatten auf den mattweißen Tisch zu werfen oder Teile der Lichtwand zu verdecken (Abbildung 46 bis Abbildung 49). Auf dem Tisch des Versuchsleiters befinden sich rechts der Computerbildschirm mit Tastatur sowie ein Stapel Blätter mit dem Versuchsablauf. Die Augenhöhe der Probanden beträgt je nach Körpergröße ca. 110-120 cm.

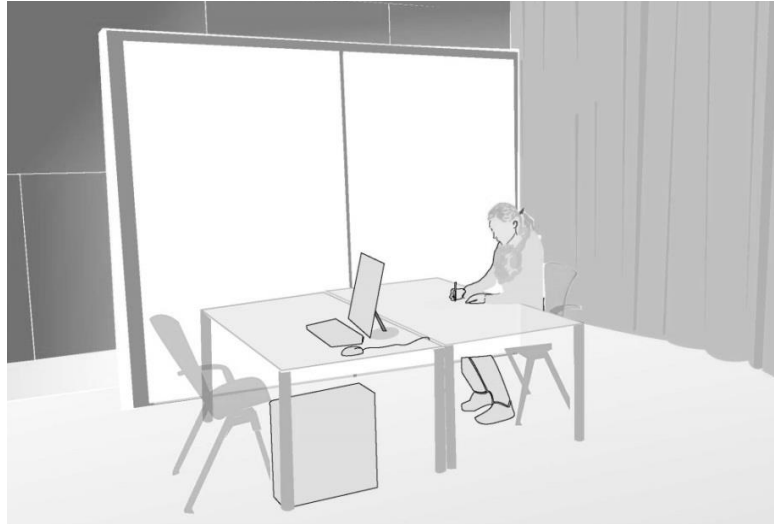


ABBILDUNG 46: VERSUCHSANORDNUNG

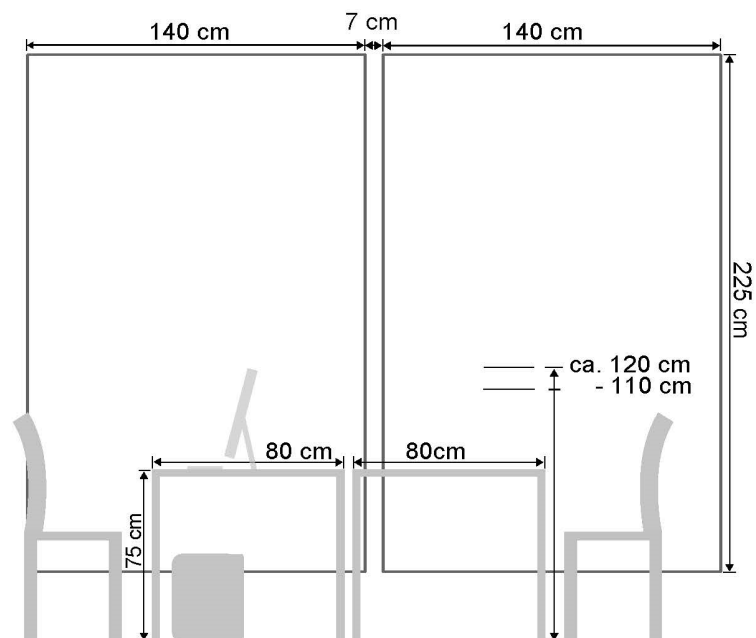


ABBILDUNG 47: VERSUCHSANORDNUNG IN VORDERANSICHT

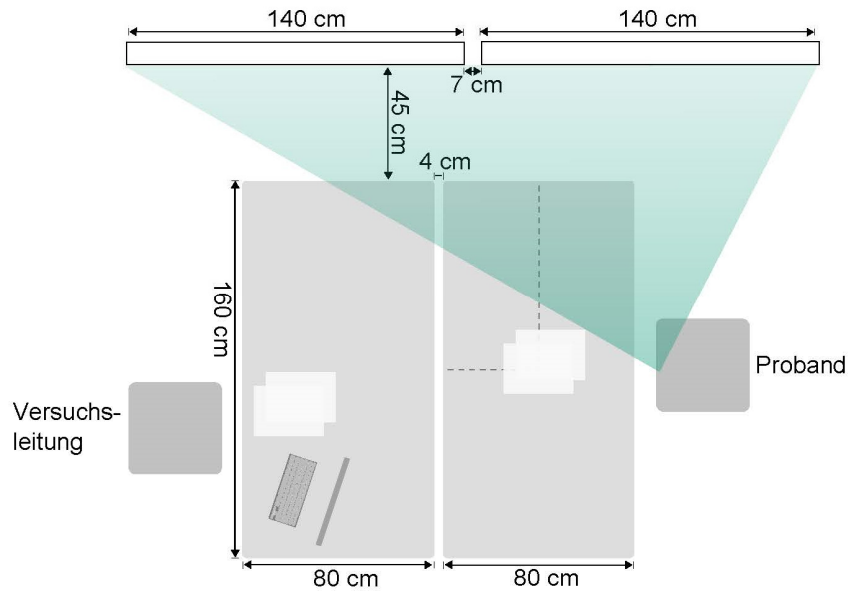


ABBILDUNG 48: VERSUCHSANORDNUNG IN DRAUFSICHT

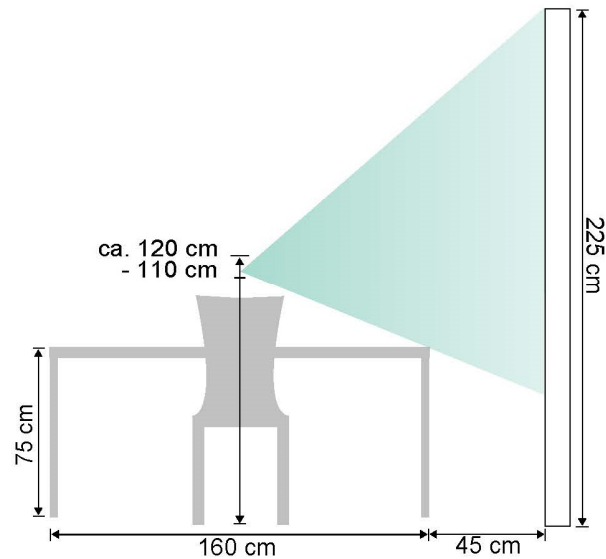


ABBILDUNG 49: VERSUCHSAUFBAU IN SEITENANSICHT VON RECHTS

5.3 Lichteigenschaften

5.3.1 Technische Spezifikation

Da sich die Technik des Virtual-Skys als zuverlässig erwies, werden bei der in diesem Versuch verwendeten Lichtwand die gleichen Module eingesetzt. Der Virtual-Sky wurde folglich nach dem in Kapitel 4 behandelten Versuch abgebaut und teilweise für diesen Versuch in vertikaler Anordnung wieder aufgebaut. Die Lichtwand verfügt über ein 8 Bit-System mit 256 möglichen Helligkeitsstufen zwischen minimaler und maximaler Beleuchtungsstärke. Aufgrund der im Versuch verwendeten

Variationsbreite von ca. 200 lx kann nur ein Teil dieser Helligkeitsstufen verwendet werden. Dadurch entsteht die - nicht wahrnehmbare - leichte Welligkeit der Beleuchtungsstärke (Abbildung 50).

5.3.2 Lichtszenarien

In diesem Versuch mit wahrnehmbaren Helligkeitsveränderungen kommen drei verschiedene Lichtszenarien zum Einsatz: „*schnell hell*“, „*schnell dunkel*“ und „*statisch*“. Alle drei Szenarien haben eine durchschnittliche Beleuchtungsstärke von 770 Lux auf dem Tisch. Integriert über den Zeitraum von 8 Minuten 30 Sekunden pro Lichtszenario ergeben sich für jede Lichtbedingung 110 Luxstunden. Die Farbtemperatur beträgt bei den beiden dynamischen Szenarien im Mittel 5250 K, sie variiert um ca. 100 K (siehe Kapitel 5.3.1). Bei dem statischen Szenario beträgt die Farbtemperatur konstant 5300 K. Bei dem Szenario „*schnell hell*“ steigt die Beleuchtungsstärke merkbar schnell an und sinkt anschließend so langsam wieder ab, dass die Veränderung nicht wahrgenommen werden kann. Beim Szenario „*schnell dunkel*“ verhält es sich entsprechend umgekehrt, während beim statischen Szenario keine Veränderung stattfindet. In Abbildung 50 ist die Beleuchtungsstärke der untersuchten Szenarien auf dem Tisch in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

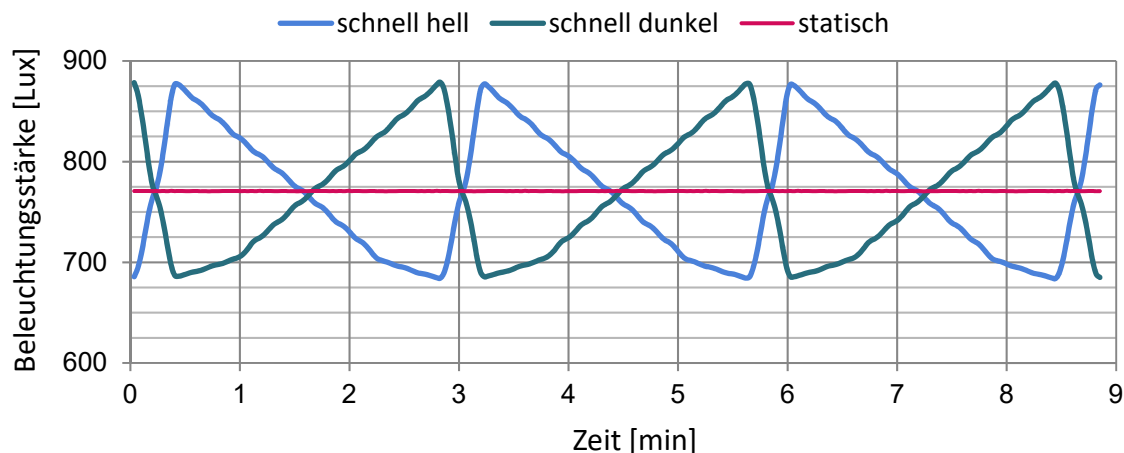


ABBILDUNG 50: VERÄNDERUNG DER BELEUCHTUNGSSTÄRKE DER DREI LICHTSZENARIEN

Die Optimierung der Lichtszenarien wurde mit Hilfe von zehn befragten Teilnehmern vor Versuchsbeginn durchgeführt. Die schrittweise Anpassung zielt auf eine wahrnehmbare Zunahme und nicht wahrnehmbare Abnahme der Helligkeit. Die Zunahme der Helligkeit um 200 Lux während 24 Sekunden wird als deutlich wahrnehmbar, überwiegend natürlich und nicht störend betrachtet. Die Abnahme der Helligkeit um den gleichen Betrag wird ab einer Dauer von 2 Minuten und 25 Sekunden von keinem der zehn Teilnehmer wahrgenommen. Zum Ausgleich der erhöhten Empfindlichkeit von Helligkeitsveränderungen in dunkler Umgebung sind die Kurven bei den niedrigeren Beleuchtungsstärken abgeflacht.

Um in dieser Studie gezielt nur den Einfluss einer zeitlichen Variation der Helligkeit zu untersuchen, ist das verwendete Lichtszenario nur zeitlich dynamisch, es existieren keine räumlichen dynamischen Effekte. Die durchgezogene, blaue Kurve in Abbildung 51 zeigt das Spektrum bei der maximal genutzten Beleuchtungsstärke, die gepunktete Linie zeigt das Spektrum der Deckenbeleuchtung ohne Lichtwand. Die Messungen sind am Auge es Probanden im Winkel von 45° zum Tisch gemessen, da die Probanden während des Versuchs die meiste Zeit auf den Tisch blicken. Zur Messung wurde das OceanOptics USB2000+UV-VIS-ES Spektrometer verwendet.

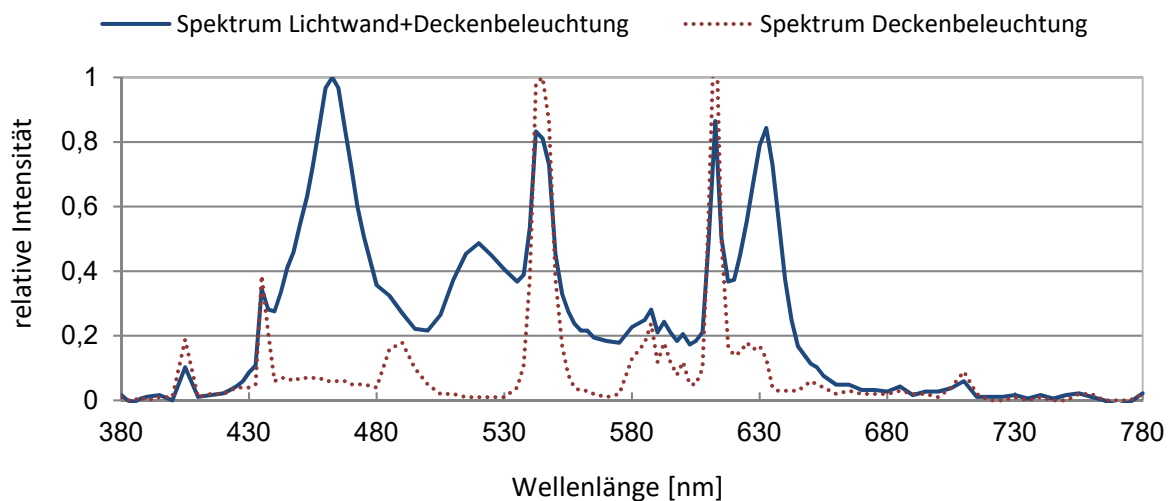


ABBILDUNG 51: RELATIVE SPEKTRALE STRAHLUNGSVERTEILUNG

5.3.1 Bewertung der psychologischen Blendung

Zur Vermeidung einer Blendung durch die Lichtwand sind die an der Lichtwand verwendeten Lichtszenarien durch die Deckenbeleuchtung mit drei Reihen Kaltkathodenröhren ergänzt. Da diese je nach Helligkeit der Lichtwand mehr oder weniger zum Gesamtspektrum beitragen, variiert das Spektrum und somit die Farbtemperatur bei den dynamischen Lichtszenarien um ca. 100 K. Wie bei der Virtual-Sky-Studie sind die Leuchtdichteverhältnisse zwischen Tisch, Umgebung und LED-Lichtwand maximal ca. 1:4. Maximal wird von der Lichtwand eine Leuchtdichte von 1000 cd/m² erreicht.

5.3.2 Visuelle und nicht-visuelle Lichtwirkung

Zur Berechnung der Anregung der einzelnen Photorezeptoren empfiehlt Lucas (Lucas et al. 2014a) die kostenlos verfügbare "Irradiance Toolbox" (vergleiche hierzu Kapitel 2.6 und 4.3.4). Abbildung 52 zeigt die effektive Beleuchtungsstärke, mit der die verschiedenen Photopigmente auf der Netzhaut angeregt werden. Gemessen wurde auf der Tischoberfläche. Dabei sind die Blau- (sc), Grün- (mc) und Rotzapfen (lc) sowie die ipRGCs (z) und Stäbchen (r) dargestellt. Die Anregung der Photorezeptoren ist vergleichbar mit der Anregung während der Virtual-Sky-Studie (Abbildung 27).

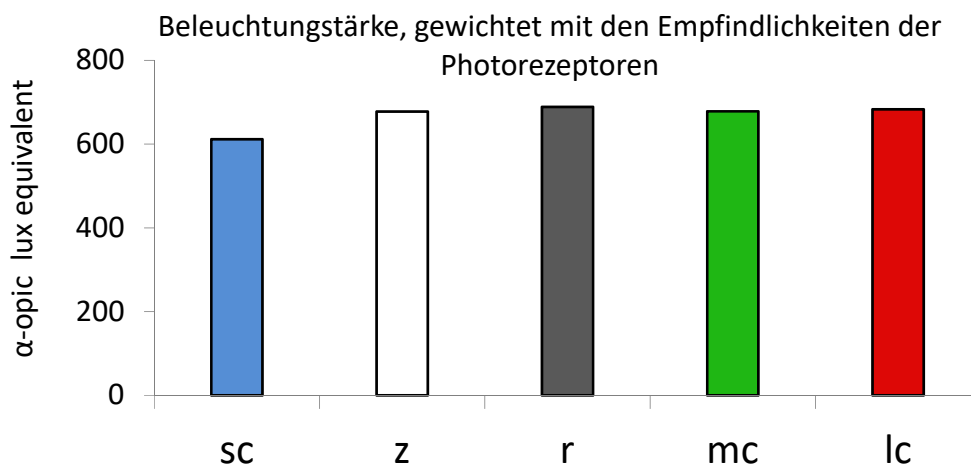


ABBILDUNG 52: EFFEKTIVE BELEUCHTUNGSSTÄRKE DER EINZELNEN PHOTOPIGMENTE (MOD. NACH (LUCAS ET AL. 2014))

5.4 Probandenkollektiv

Wie bei der Untersuchung ultradianer Lichtwechsel mit dem Virtual-Sky sollten auch hier die Probanden erwachsen sein und nicht unter einer Störung des Sehapparates leiden. Da bei älteren Menschen eine Beeinträchtigung des Sehens wahrscheinlicher ist (Weale 1988), wurden 31 Probanden ausgewählt, die nicht älter als 35 Jahre sind. Zur Fallzahlkalkulation wurde Formel 10 verwendet. Drei Probanden waren zwar zwischen 41 und 55 Jahren alt, hatten aber nach eigenen Angaben keine Sehbeeinträchtigung. Alle Teilnehmer waren Mitarbeiter oder Praktikanten des Fraunhofer IAO, welche freiwillig an der Studie teilnahmen. Die Probanden wurden nicht darüber informiert, wie sich die einzelnen Szenarien unterscheiden und welche Ergebnisse erwartet werden. Sie wurden nur darüber informiert, dass ein Versuch zur *Wirkung des Lichts auf Konzentration, Kreativität und Wohlbefinden* durchgeführt wird.

5.5 Versuchsablauf

Vor Beginn des Versuchs wird den Probanden zunächst der Ablauf des Versuchs erklärt. Um sich mit den Aufgaben vertraut zu machen, bekommen sie eine Einweisung in den Test d2 sowie eine Zeile zum Üben. Anschließend wird den Probanden erläutert, dass sie beim Kreativitätstest zeichnen dürfen was

sie möchten und dabei nichts falsch machen können. In einem benachbarten Raum legen sie sich anschließend den Herzfrequenzsensor nach Anweisung (fester Sitz unterhalb der Brust, Befeuchtung mit hautfreundlichem Desinfektionsgel) selbst an. Jeder Teilnehmer wird nun folgendes Programm durchlaufen:

1. 5 bis 10 Minuten: Adaption an die Lichtwand bei 770 lx
2. Eingangsfragebogen
3. KSS
4. MDBF
5. Beginn des Lichtszenarios
6. 1 Minute Eingewöhnungszeit an das Lichtszenario
7. Aufnahme der HRV
8. 3:30 Minuten: Konzentrationstest mit Test d2
9. 3:30 Minuten: Kreativitätstest mit TSD-Z
10. Beendung der Aufnahme der HRV
11. VAS
12. KSS
13. MDBF
14. Pause
15. Wiederholung 5 – 14 mit zweitem Lichtszenario
16. Wiederholung 5 – 14 mit drittem Lichtszenario

Die drei Lichtszenarien wurden den Probanden in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Jeder Proband wurde bei jedem Szenario einmal getestet. Beim Kreativitätstest wird nach jedem Durchgang eine neue Variante bearbeitet.

5.6 Ergebnisse des Experiments mit ultradianer zeitlich dynamischer Beleuchtung

5.6.1 Ergebnisse des mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogens

Zur Auswertung der momentanen Befindlichkeiten wird der MDBF-Score verwendet (vergleiche Kapitel 5.1.4). Die Ergebnisse sind in Abbildung 53 bis Abbildung 55 nach den verschiedenen Lichtszenarien dargestellt.

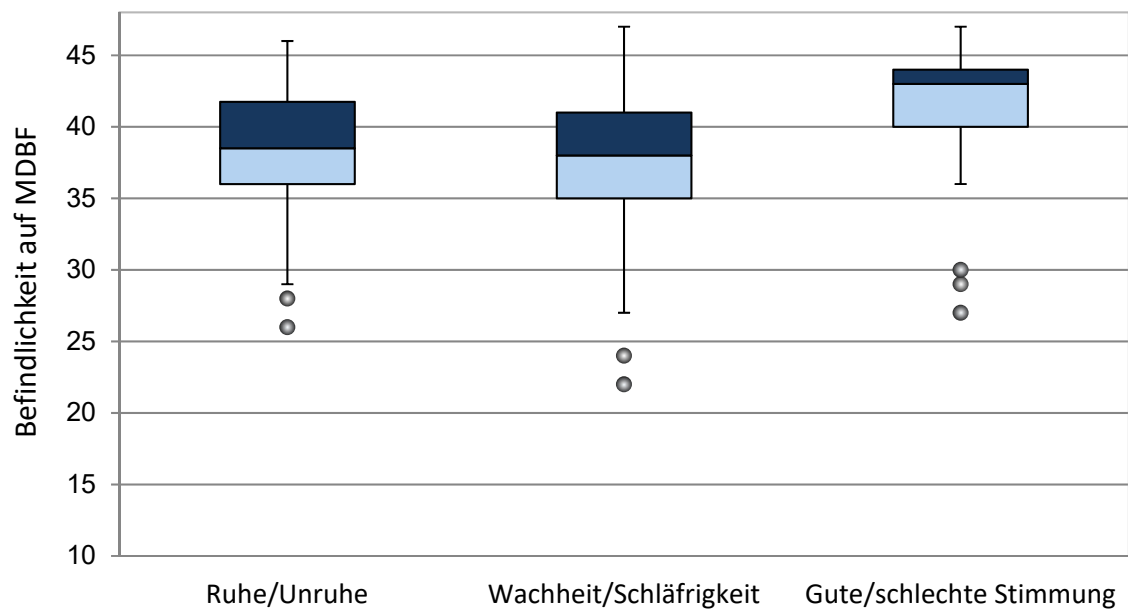


ABBILDUNG 53: ERGEBNISSE DES MDBF IN DEN DREI KATEGORIEN NACH *SCHNELL HELL*

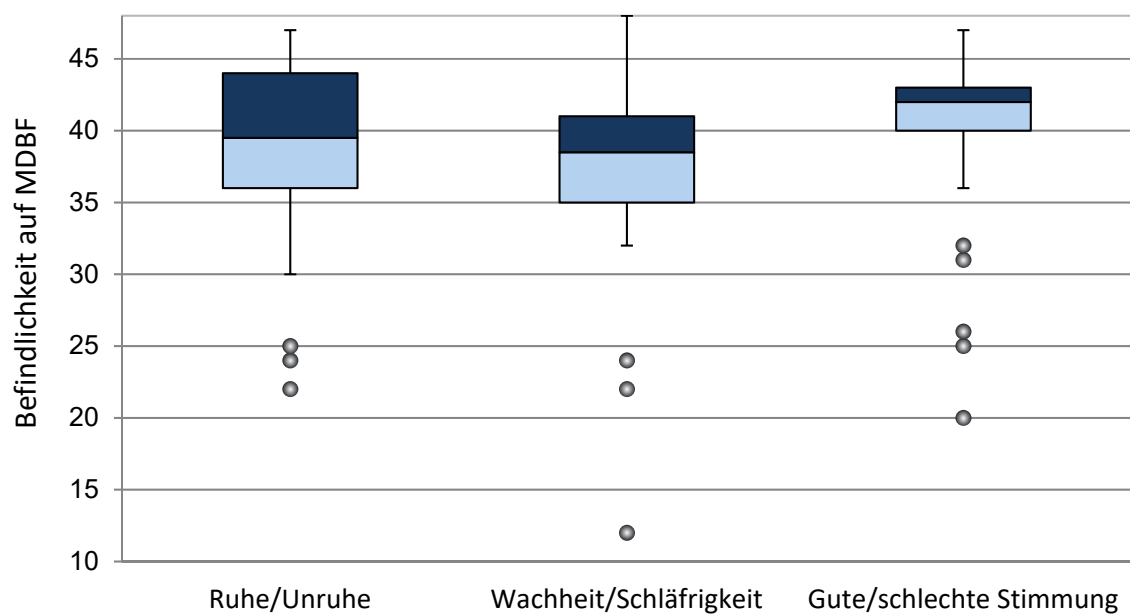


ABBILDUNG 54: ERGEBNISSE DES MDBF IN DEN DREI KATEGORIEN NACH *SCHNELL DUNKEL*

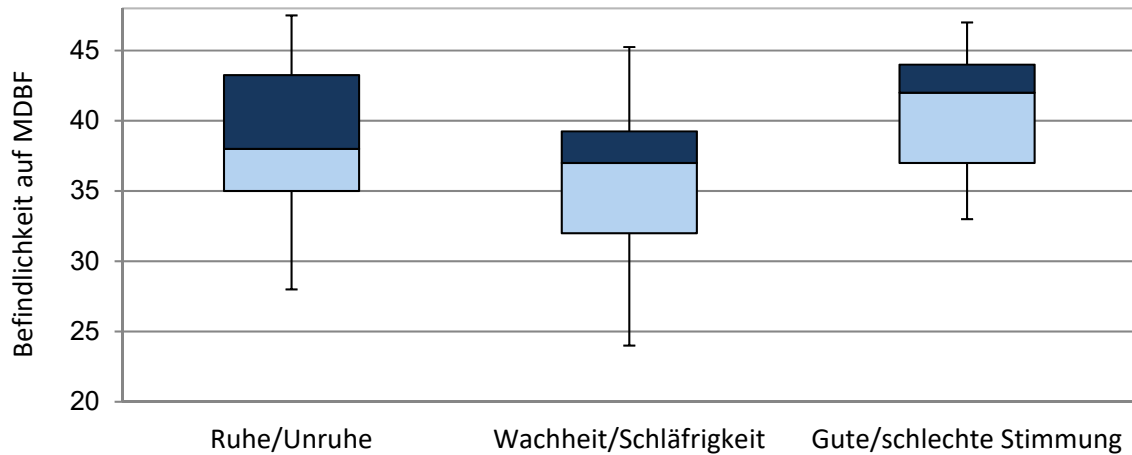


ABBILDUNG 55: ERGEBNISSE DES MDBF IN DEN DREI KATEGORIEN NACH STATISCH

Die einfaktorielle ANOVA zum Vergleich der drei Kategorien des MDBF zeigte keine Unterschiede zwischen den vier Zeitpunkten der Erhebung. Folglich hat keine der drei Lichtszenarien die Befindlichkeit der Probanden geändert. Die Ergebnisse der ANOVA in den einzelnen Kategorien sehen wie folgt aus: Ruhe/Unruhe ($p = 0,47$), Wachheit/Schläfrigkeit ($p = 0,47$), gute/schlechte Stimmung ($p = 0,91$).

Aus Abbildung 56 ist ersichtlich, dass sich die Ergebnisse zwischen den einzelnen Szenarien kaum von denen vor dem Versuch unterscheiden. Obwohl die geringen Unterschiede nicht signifikant sind, hat der MDBF-Score bei keiner Kategorie durch kein Szenario abgenommen, sondern tendenziell (aber nicht signifikant) zugenommen, d.h. die subjektiven Befindlichkeiten der Probanden wurden durch die Lichtszenarien keinesfalls negativ beeinflusst.

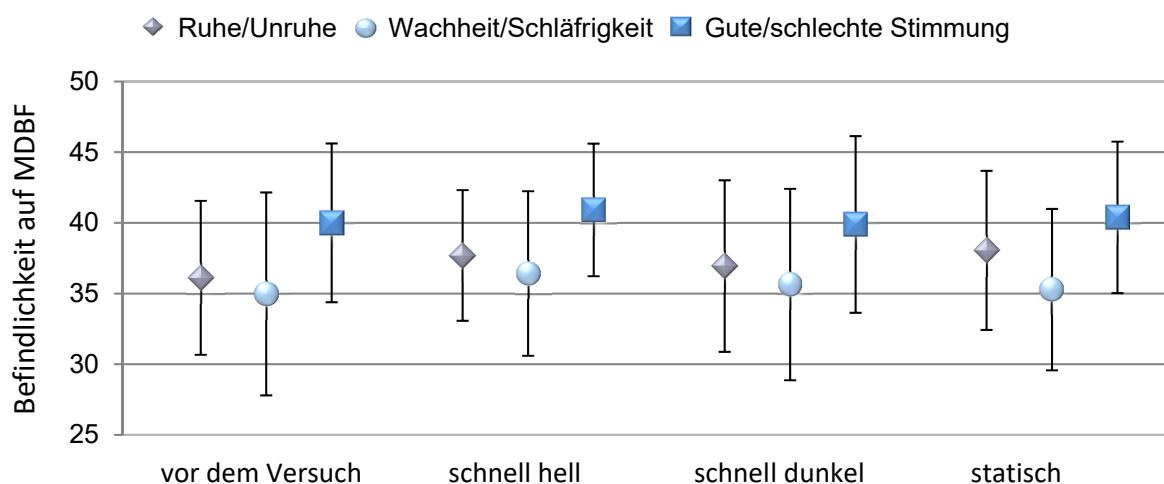


ABBILDUNG 56: DURCHSCHNITTSWERTE DER MDBF-SCORES FÜR ALLE LICHTSZENARIEN SOWIE VOR DEM VERSUCH

5.6.2 Ergebnisse der Karolinska Sleepiness Scale

Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse der Karolinska Sleepiness Scale (KSS) zur Bewertung der subjektiven Müdigkeit der Probanden. Die Probanden beurteilen ihre Müdigkeit vor dem Versuch mit durchschnittlich $3,7 \pm 1,6$ auf der KSS. Der niedrigere KSS-Wert nach allen drei Lichtbedingungen deutet auf höhere subjektive Wachheit der Probanden hin. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant ($p = 0,77$). Da die Werte nicht bei allen Szenarien normalverteilt sind, wurde mit dem Friedman-Test auf Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen geprüft.

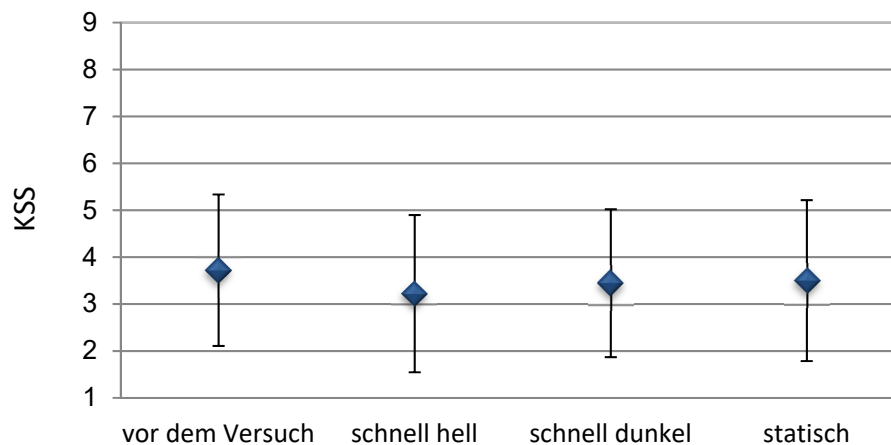


ABBILDUNG 57: MÜDIGKEIT AUF DER KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE VOR DEM VERSUCH UND NACH DEN EINZELNEN SZENARIEN.

Frauen fühlen sich vor dem Versuch deutlich müder als Männer ($p = 0,005$), sie geben ihre Müdigkeit vor dem Versuch mit durchschnittlich $4,5 \pm 1,8$ an, während sich die Männer mit durchschnittlich $3,2 \pm 1,2$ wacher beurteilen. Die Veränderung der Müdigkeit durch Einwirken der Lichtszenarien war bei Frauen größer als bei Männern, sie beurteilen sich nach allen drei Szenarien wacher als die männlichen Probanden (Abbildung 58). Nach dem Szenario *schnell hell* sind sie signifikant wacher als die männlichen Probanden ($p = 0,02$). Die standardisierte Effektgröße δ beträgt dabei 0,25, der Effekt ist also klein (Bortz und Schuster 2010). Bei dem *schnell dunkel* Szenario sind die weiblichen Versuchspersonen ebenfalls signifikant wacher als die Männer ($p = 0,048$; $\delta = 0,27$). Wie bei den Dynamiken fühlen sich auch nach dem statischen Szenario die Männer tendenziell (n.s.) müder und die Frauen wacher ($p = 0,20$).

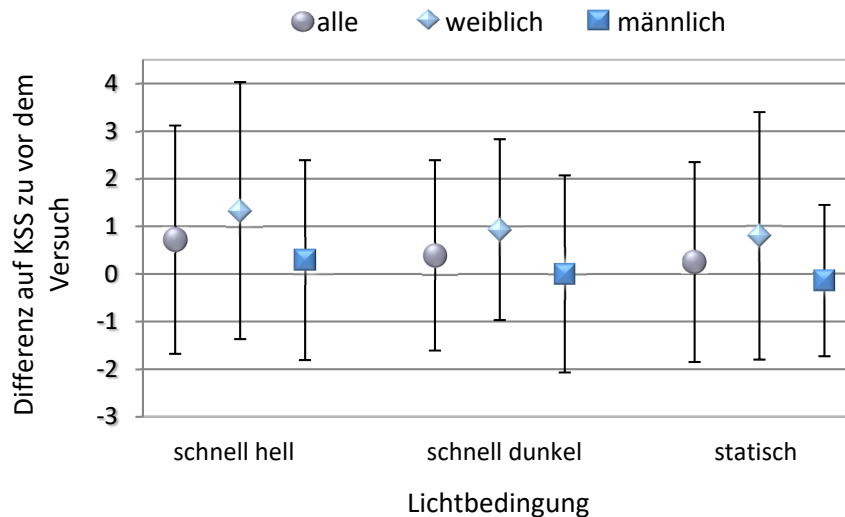


ABBILDUNG 58: DIFFERENZEN DER KSS-WERTE VOR DEM VERSUCH ZU NACH DEN LICHTSZENARIEN.

Die KSS-Werte nach den einzelnen Durchgängen, aufgelistet nach der Reihenfolge der Versuche (Abbildung 59), lassen zunächst vermuten, dass sich die Probanden durch jedes der drei Lichtszenarien wacher fühlen (kleinerer KSS-Wert). Der Friedman-Test findet jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Durchgängen ($p = 0,25$), somit sind keine Reihenfolgeeffekte wie z. B. Ermüdung durch den Testablauf feststellbar.

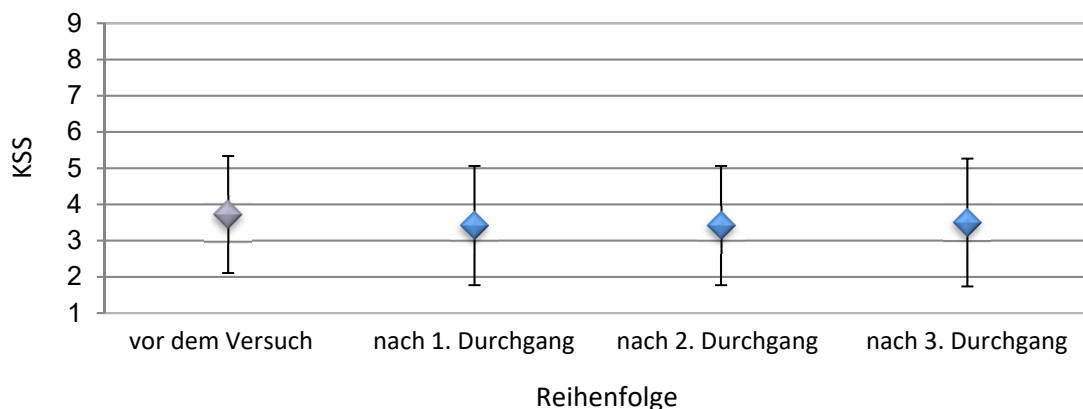


ABBILDUNG 59: ERGEBNISSE DER KAROLINSKA SLEEPINESS SCALE VOR DEM VERSUCH UND NACH DEN EINZELNEN DURCHGÄNGEN

Stellt man die KSS-Werte vor dem Versuch mit den Werten nach dem Szenario *schnell hell* in Korrelation, ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang ($p_s = 0,67$). D.h., je müder die Probanden vor dem Versuch waren, desto wacher werden sie durch das Lichtszenario *schnell hell*. In den drei nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 60 bis Abbildung 62) sind die KSS-Werte vor dem Versuch (x-Achse) und die Differenz zwischen den Werten vor dem Versuch und nach den Versuchen eingetragen (y-Achse). Kreise, die auf der waagerechten Nulllinie liegen, bedeuten *keine Veränderung*. Liegen die Kreise darüber, fühlen sich die Probanden nach dem entsprechenden Szenario wacher als vorher. Liegen die Kreise darunter, wurden sie müder. Ein positives Delta bedeutet also eine Verringerung des

KSS-Wertes, die Probanden wurden wacher. Ein negatives Delta bedeutet einen höheren KSS-Wert, also wurden die Probanden müder. Die Korrelation zwischen den KSS-Werten vor dem Versuch und der Differenz zu dem Szenario *schnell dunkel* ergibt einen Zusammenhang von $\rho_s = 0,51$. Je müder die Probanden vor dem Versuch sind, desto wacher sind sie nach dem Szenario *schnell dunkel*. Bei dem statischen Szenario ist der Zusammenhang ähnlich $\rho_s = 0,51$. Die Größe der Kreise entspricht der Häufigkeit der Probanden. Die kleinsten Kreise stellen jeweils einen einzelnen Probanden dar.

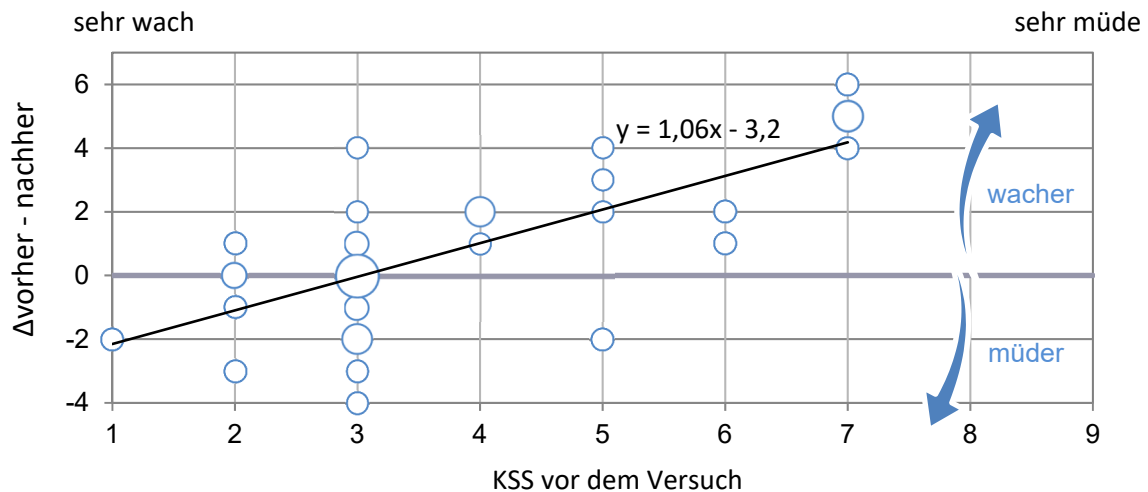


ABBILDUNG 60: DIFFERENZ KSS-WERT VOR DEM VERSUCH - SCHNELL HELL, AUFGETRAGEN ÜBER DEN KSS-WERT VOR DEM VERSUCH

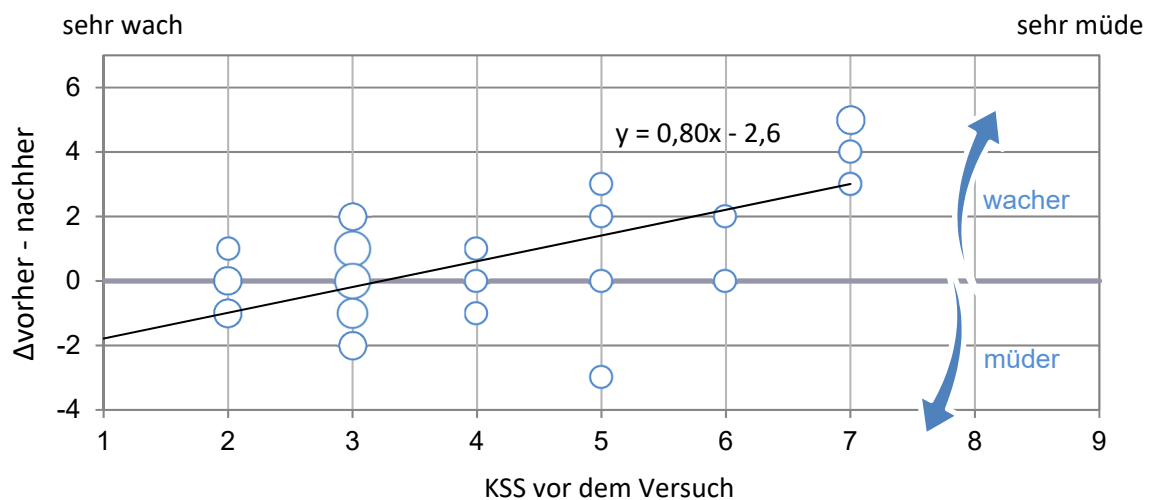


ABBILDUNG 61: DIFFERENZ KSS-WERT VOR DEM VERSUCH - SCHNELL DUNKEL, AUFGETRAGEN ÜBER DEN KSS-WERT VOR DEM VERSUCH

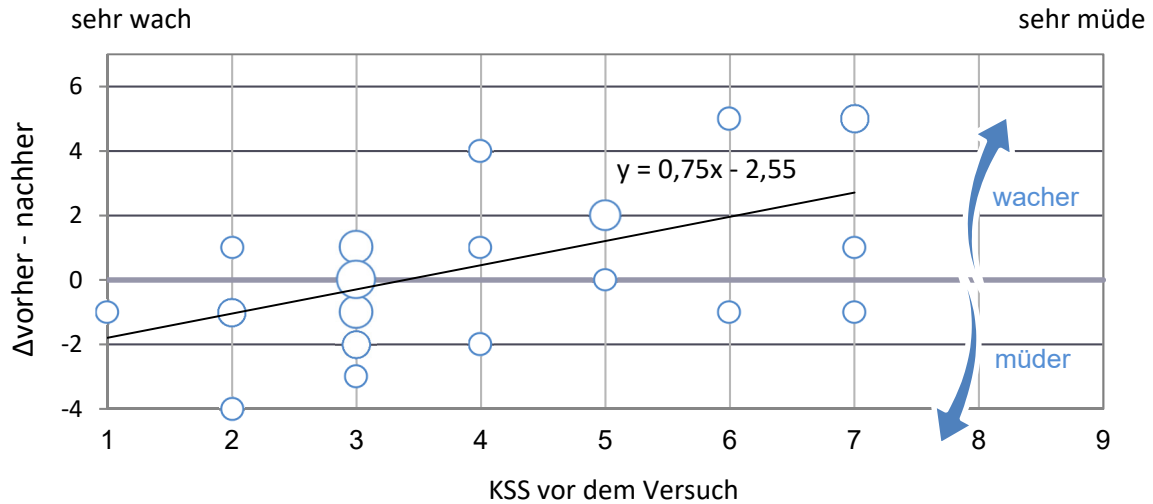


ABBILDUNG 62: DIFFERENZ KSS-WERTS VOR DEM VERSUCH – STATISCH, AUFGETRAGEN ÜBER DEN KSS-WERT VOR DEM VERSUCH

Bei allen drei Szenarien gab es einzelne Versuchspersonen, die vor dem Versuch sehr wach waren und nach den Lichtszenarien dann jeweils müder wurden (negatives Δ).

Vergleicht man den Korrelationskoeffizient des Szenarios *schnell hell* ($\rho_s = 0,67$) mit den Korrelationskoeffizienten der Szenarien *schnell dunkel* ($\rho_s = 0,51$) und *statisch* ($\rho_s = 0,51$), erhält man über Fishers z-Transformation ein Signifikanzniveau von 15,7 % ($p = 0,16$). Da dieser Unterschied nicht signifikant ist, kann man davon ausgehen, dass sich das Szenario *schnell hell* der Müdigkeit nicht stärker entgegenwirkt als *schnell dunkel* oder *statisch*.

5.6.3 Ergebnisse des Tests zum schöpferischen Denken (TSD-Z)

Um den Lerneffekt bei den Ergebnissen des TSD-Z bei der Auswertung zu berücksichtigen, wurden die Daten in den zeitlich aufeinanderfolgenden Durchgängen ausgewertet. Die Probanden konnten während der 3 Minuten 30 Sekunden dauernden Testphase maximal 66 Punkte erreichen. Die Ergebnisse des TSD-Z waren in allen Gruppen normalverteilt.

In Durchgang 3 wurden nur 35 Probanden bei der Auswertung berücksichtigt, da bei einem Probanden versehentlich zweimal die Variante B des TSD-Z durchgeführt wurde, anstatt im dritten Durchgang (statisches Szenario) die Variante C. Ein Lerneffekt wurde nicht festgestellt (Abbildung 63). Die Auswertung der erreichten Punkte hinsichtlich der drei Lichtszenarien ergibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Szenarien ($p = 0,73$). Auch in der Darstellung der Boxplots (Abbildung 64) sind keine Trends zu erkennen.

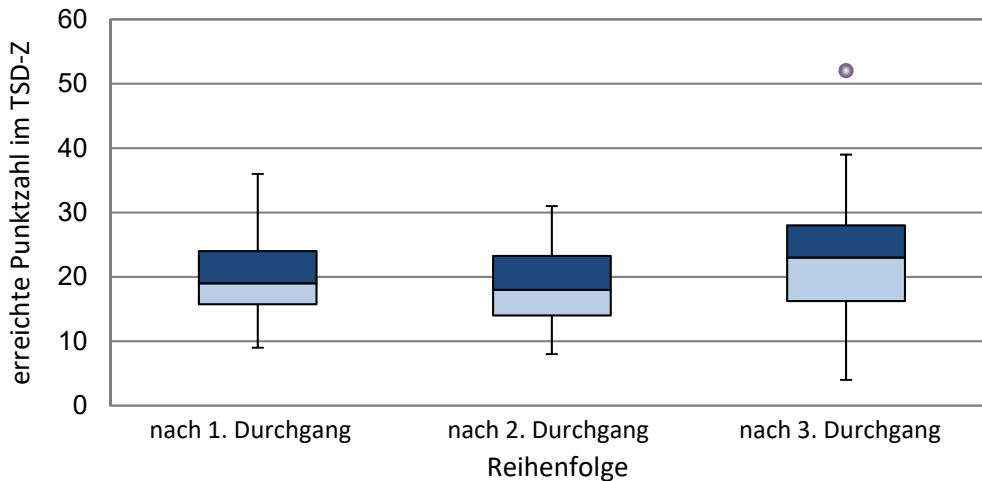


ABBILDUNG 63: VERTEILUNG DER ERREICHTEN PUNKTZAHLN BEIM TSD-Z IN DEN DREI AUF EINANDERFOLGENDEN DURCHGÄNGEN

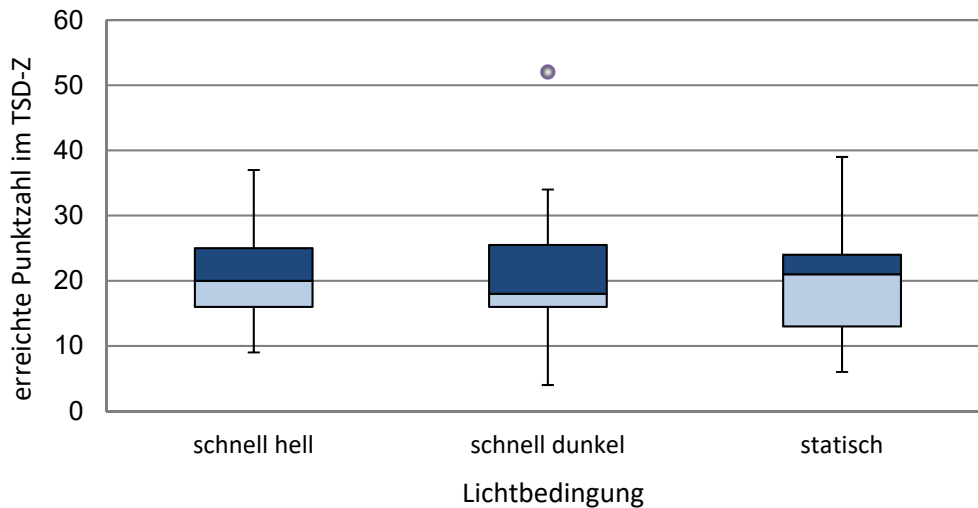


ABBILDUNG 64: VERTEILUNG DER ERREICHTEN PUNKTZAHLN DES TSD-Z WÄHREND DER VERSCHIEDENEN LICHTSZENARIEN

5.6.4 Ergebnisse Test d2

Zur Berücksichtigung des Lerneffekts beim Test d2 werden im Folgenden die zeitlich aufeinanderfolgenden Durchgänge ausgewertet. Eine ANOVA zeigt höchst signifikante Unterschiede zwischen mindestens einem Paar der Durchgänge ($p \leq 0,01$). Der Post-Hoc-Test mit Bonferroni-Korrektur ergibt jeweils eine signifikante Steigerung der bearbeiteten Zeichen zwischen dem ersten und zweiten, sowie dem ersten und dritten Durchgang ($p \leq 0,01$ und $p \leq 0,01$). Da im zweiten Durchgang durchschnittlich 15 % mehr Zeichen bearbeitet wurden, werden diese im zweiten Durchgang von den bearbeiteten Zeichen abgezogen, da der offensichtliche Lerneffekt korrigiert werden soll. Im dritten Durchgang wird die Gesamtzahl mit -18 % korrigiert. Erst nach dieser Korrektur werden die zuvor bei der Versuchsdurchführung randomisierte Reihenfolge der Lichtszenarien ausgewertet und nach Szenario sortiert. In Abbildung 65 ist die Verteilung der Anzahl bearbeiteter Zeichen in den Tests d2 mit und ohne Korrektur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Mediane

der korrigierten Anzahl von der nicht korrigierten unterscheiden. Zwischen den Lichtszenarien besteht jedoch kein Unterschied. Der Mittelwert der korrigierten Anzahl bearbeiteter Zeichen beträgt während *schnell hell* 312 ± 59 , während *schnell dunkel* 315 ± 57 und während *statisch* 309 ± 61 .

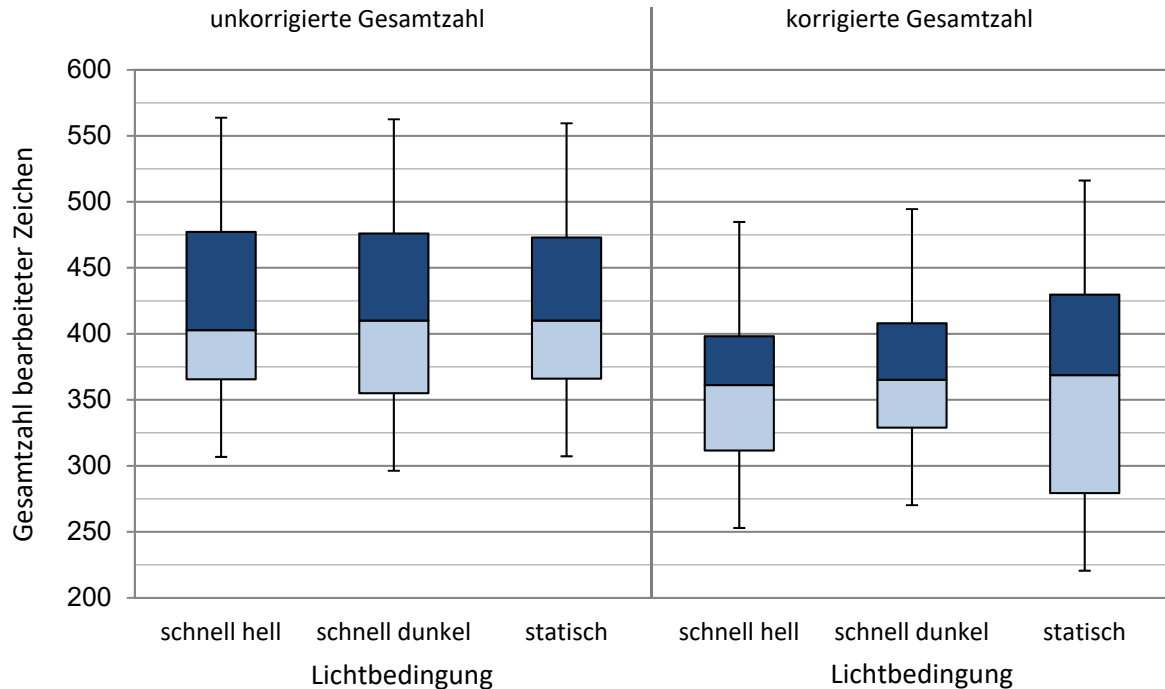


ABBILDUNG 65: ANZAHL BEARBEITETER ZEICHEN IM TEST D2

Bei jedem Lichtszenario ist die korrigierte Anzahl der bearbeiteten Zeichen normalverteilt. Die leichte Tendenz, dass bei den beiden dynamischen Szenarien durchschnittlich etwas mehr Zeichen bearbeitet wurden als bei der statischen Beleuchtung, ist nicht signifikant ($p = 0,23$).

Zusätzlich zur Gesamtzahl der bearbeiteten Zeichen ist der prozentuale Fehleranteil ($F_{\%}$) ausgewertet. Dieser berechnet sich aus dem Quotienten der falsch markierten (F_2) und der ausgelassenen Zeichen (F_1) sowie der Gesamtzahl (GZ) der bearbeiteten Zeichen, wie Formel 11 zeigt.

FORMEL 11: PROZENTUALER FEHLERANTEIL BEIM TEST D2

$$F_{\%} = \frac{(F_1 + F_2)}{GZ}$$

Die Werte sind auch hier normalverteilt. Eine ANOVA ergibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien. Der prozentuale Fehleranteil in den einzelnen Szenarien ist in Abbildung 66 dargestellt.

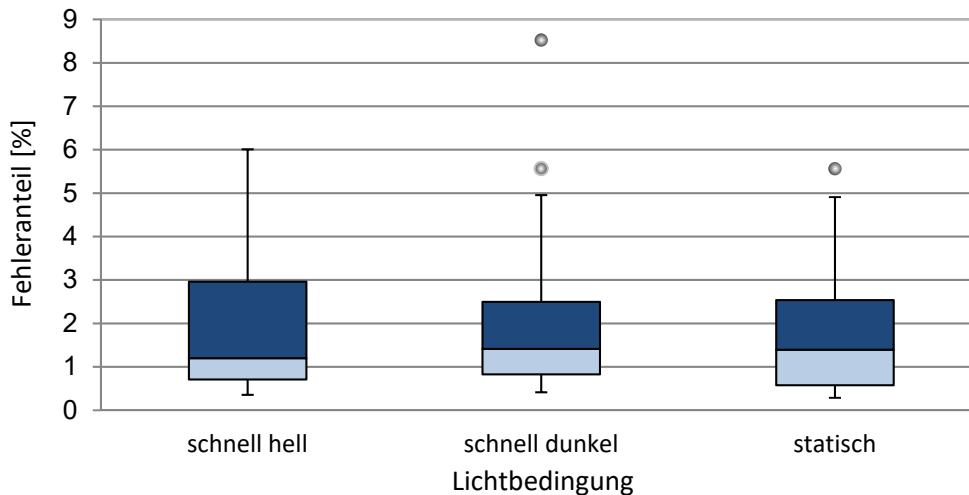


ABBILDUNG 66: PROZENTUALER FEHLERANTEIL IM TEST D2 SORTIERT NACH LICHTBEDINGUNG

Der durchschnittliche prozentuale Fehleranteil ist während *schnell hell* $1,5\% \pm 1,5$, während *schnell dunkel* $1,7\% \pm 1,9$ und während dem statischen Szenario $1,5\% \pm 1,6$. Der tendenziell etwas höhere Fehleranteil bei *schnell dunkel* geht einher mit der tendenziell höheren Anzahl der bearbeiteten Zeichen.

5.6.5 Ergebnisse der Herzratenvariabilität (HRV)

In die Betrachtungen der erhobenen Daten zur Herzratenvariabilität gehen nur die Ergebnisse von 33 der 36 Probanden ein, da bei zwei Probanden die HRV aufgrund lückenhafter Messungen nicht ausgewertet werden konnte. Bei einem weiteren Probanden wurde die HRV aufgrund chronischer Darm- und Schilddrüsenerkrankungen nicht ausgewertet. Die durchschnittlichen Werte aller verwertbaren Ergebnisse sind in Tabelle 11 mit Standardabweichung sortiert nach Art der Tätigkeit (Konzentrations- und Kreativitätstest) dargestellt.

Der Post-Hoc-Test (paarweise Vergleiche mit Bonferroni-Korrektur) mit den Werten des meanRR während des Kreativitätstests ergibt, dass während des *statischen* Szenarios der meanRR signifikant höher ist als während *schnell dunkel* ($p = 0,01$) und höher als während des *schnell hell* Szenarios ($p = 0,06$). Während des Kreativitätstests hatten die Probanden also während des *statischen* Szenarios einen niedrigeren Durchschnittspuls als während der beiden dynamischen Szenarien. Während des Tests d2 ergeben sich keine nachweisbaren Unterschiede des meanRR.

Der Post-Hoc-Test (paarweise Vergleiche mit Bonferroni-Korrektur) mit den Werten des pNN50 während des Kreativitätstests zeigt, dass während des *statischen* Szenarios der durchschnittliche Wert tendenziell höher war als während *schnell hell* ($p = 0,12$) und *schnell dunkel* ($p = 0,06$). Diese Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

TABELLE 11: ERGEBNISSE DER HERZRATENVARIABILITÄT WÄHREND DEM TEST D2 UND DEM KREATIVITÄTSTEST (N=33)

	LichtszENARIO	meanRR [ms]	SDRR [ms]	RMSSD [ms]	pNN50 [%]	HRV triangular index	FFT LF/HF	AR LF/HF
Test d2		824 ±146	50,8 ±19,5	37,4 ±19,0	16,3 ±17,2	12,1 ±4,1	3,3 ±3,4	2,8 ±2,6
	<i>schnell hell</i>							
	<i>schnell dunkel</i>	826 ±152	50,3 ±19,8	37,7 ±23,8	17,2 ±19,0	11,3 ±3,4	2,9 ±2,9	2,8 ±2,4
	<i>statisch</i>	834 ±150	50,6 ±20,5	37,1 ±22,1	17,1 ±18,7	11,7 ±3,2	2,9 ±2,4	2,8 ±2,5
Kreativitätstest								
	LichtszENARIO	meanRR [ms]	SDRR [ms]	RMSSD [ms]	pNN50 [%]	HRV triangular index	FFT LF/HF	AR LF/HF
	<i>schnell hell</i>	825 ±140	58,9 ±20,6	43,7 ±23,4	17,3 ±15,7	12,3 ±4,0	12,3 ±2,2	2,9 ±2,0
	<i>schnell dunkel</i>	829 ±130	56,5 ±21,1	39,0 ±21,3	18,0 ±18,0	12,4 ±4,1	3,4 ±3,5	3,0 ±2,7
	<i>statisch</i>	847 ±137	61,1 ±24,4	42,9 ±24,3	21,7 ±22,1	12,6 ±4,2	3,0 ±2,2	3,1 ±2,5

5.6.6 Subjektives Gefallen der Lichtszenarien

Das subjektive Gefallen der Lichtszenarien wurde von den Teilnehmern auf einer visuellen analogen Skala (VAS) zwischen 0 – *gefällt gar nicht* und 100 – *gefällt sehr* bewertet. Das statische Szenario ist mit durchschnittlich 69 ± 19 und das *schnell hell* Szenario mit 68 ± 21 bewertet. Das *schnell dunkel* Szenario ist mit durchschnittlich 61 ± 21 zwar schlechter bewertet, eine ANOVA zeigt aber, dass sich die Szenarien nicht signifikant voneinander unterscheiden ($p = 0,14$). Die Ergebnisse des subjektiven Gefallens auf der VAS sind in Abbildung 67 dargestellt.

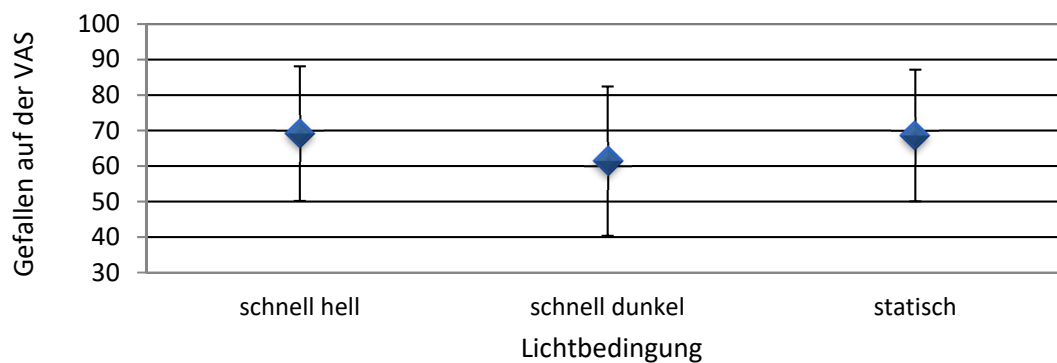


ABBILDUNG 67: ERGEBNISSE DER VAS NACH LICHTBEDINGUNG

Das statische Szenario wird, wie in Abbildung 68 zu erkennen, von Frauen und Männern fast gleich bewertet. *Schnell hell* und *schnell dunkel* wird von Männern tendenziell besser bewertet, wobei sich nur das Szenario *schnell dunkel* in der Bewertung gegenüber den weiblichen Probandinnen signifikant unterscheidet ($p = 0,03$). Männer bewerten *schnell dunkel* mit durchschnittlich 72 ± 16 , während Frauen das Szenario mit 56 ± 23 bewerten. Beide dynamischen Szenarien scheinen den Männern tendenziell besser zu gefallen als das statische, während bei den Frauen die beiden dynamischen Szenarien schlechter abschneiden als das statische. Diese Unterschiede sind allerdings nicht signifikant ($p_{\text{schnell hell}} = 0,31$; $p_{\text{schnell dunkel}} = 0,09$; $p_{\text{statisch}} = 0,40$). In Abbildung 68 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Standardabweichung der Antworten bei Frauen bei allen drei Szenarien größer ist als bei Männern.

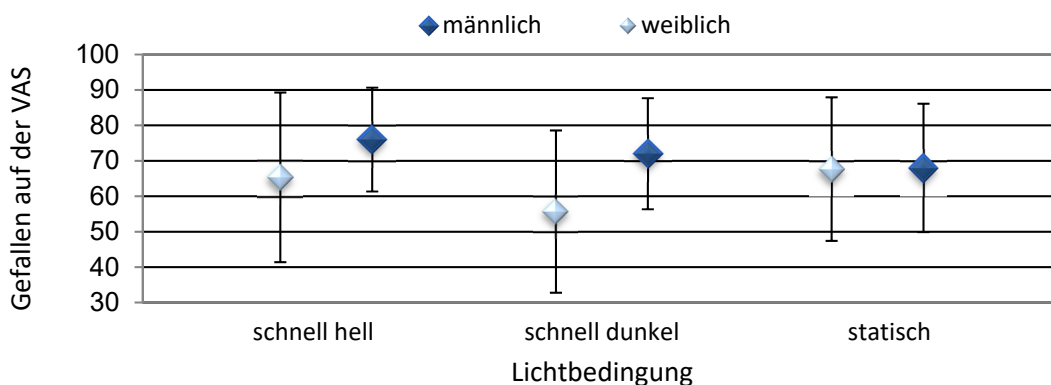


ABBILDUNG 68: ERGEBNISSE DER VAS NACH LICHTBEDINGUNG UND GESCHLECHT

5.6.7 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die zu Beginn dieser Studie formulierten Fragestellungen sind anhand der zuvor dargestellten Ergebnisse beantwortet und werden im Folgenden zusammengefasst und diskutiert.

- ➔ Wie sind die Befindlichkeiten, wenn Probanden einem heller werdenden Licht ausgesetzt werden?

Zwischen den einzelnen Lichtszenarien weisen die Ergebnisse zur Befragung der Befindlichkeiten keine Unterschiede auf. Genauso wenig konnten Unterschiede zum Befinden vor dem Versuch nachgewiesen werden. Obwohl eine sofortige Wirkung des heller werdenden Lichts erwartet wurde, kann diese Wirkung nicht nachgewiesen werden.

- ➔ Fühlen sich die Probanden wacher, wenn sie einem heller werdenden Szenario ausgesetzt werden? Fühlen sie sich im Gegensatz dazu müder, wenn sie einem dunkler werdenden Szenario oder statischem Licht ausgesetzt werden?

Die Probanden haben sich nach dem *schnell hell* Szenario nicht signifikant wacher gefühlt. Trotzdem sind leichte Tendenzen (n.s.) zu erkennen, dass sie sich nach den beiden dynamischen Lichtszenarien etwas wacher beurteilt haben als vor dem Versuch oder nach dem statischen Szenario. Dies gilt für das Szenario *schnell hell* und *schnell dunkel*. Das schnell dunkler werdende Lichtszenario führte folglich nicht dazu, dass sich die Probanden müder fühlten. Die Hypothese, dass ein heller werdendes Licht aktivierend wirkt, wurde nur bestätigt, wenn die Probanden vor dem Versuch bereits müde waren. Je müder die Probanden zu Versuchsbeginn waren, desto größer war auch der aktivierende Effekt der Beleuchtung. Der größte Zusammenhang war hierbei beim Lichtszenario *schnell hell* zu erkennen. Bei *schnell dunkel* und dem statischen Licht besteht dieser Zusammenhang ebenfalls, ist jedoch nicht so stark ausgeprägt. Wenn sich die Probanden vor dem Versuch sehr wach fühlten, konnte keine weitere Aktivierung erreicht werden, sondern im Gegenteil eine stärkere Ermüdung nach den Tests, welche vermutlich durch die mentale Anstrengung verursacht wurde. Die geringere Aktivierung bei Männern geht vermutlich einher mit der Tatsache, dass die Männer vor dem Versuch wacher waren als die Frauen. Eine Zunahme der Müdigkeit wurde nur bei einzelnen Teilnehmern festgestellt. Generell gab es keine Reihenfolgeeffekte bzw. eine Zunahme der Müdigkeit, welche mit der Testdauer zunahm. Korrelationen lassen nicht unbedingt Schlüsse auf die Ursache zu, da jedoch die Versuche unter bestmöglich kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurden, ist höchstwahrscheinlich die Abnahme der Müdigkeit auf die aktivierende Wirkung der Lichtszenarien zurückzuführen.

- ➔ Fördern dynamische Lichtszenarien das kreative Denken?

Während der beiden dynamischen Lichtszenarien haben die Probanden bei dem verwendeten Test zum schöpferischen Denken keine höhere Punktzahl erreicht als während des statischen Lichts. Mit diesem Versuch konnte folglich nicht bestätigt werden, dass dieses dynamische Lichtszenario das

kreative Denken fördert. Die erreichte Punktzahl unterscheidet sich zwischen den drei verschiedenen Szenarien nicht.

➔ Können die Probanden während des statischen Szenarios konzentrierter arbeiten?

Während des statischen Lichts haben die Probanden prozentual gleich viele Fehler gemacht wie während der beiden dynamischen Lichtszenarien. Die Anzahl der bearbeiteten Zeichen ist ebenfalls während allen drei Lichtszenarien gleich, es gibt keine signifikanten Unterschiede. Während der beiden dynamischen Lichtszenarien sind tendenziell (n.s.) mehr Zeichen bearbeitet worden als während des statischen Lichts. Das widerspricht der Hypothese der erhöhten Konzentrationsleistung bei statischem Licht und der Ablenkung durch dynamisches Licht. Aufgrund der leicht (n.s.) aktivierenden Wirkung der dynamischen Szenarien könnte die bessere Konzentrationsleistung zu erklären sein. Die Fehlerhäufigkeit war während des schnell dunkler werdenden Szenarios am größten, es wurden jedoch auch die meisten Zeichen bearbeitet. Die Probanden arbeiteten also während dieses Szenarios etwas schneller, aber auch ungenauer. Das beste Verhältnis zwischen Schnelligkeit und Fehlerhäufigkeit ergab sich mit dem *schnell hell* Szenario. Beim statischen Licht wurden etwas mehr Fehler gemacht und gleichzeitig weniger Zeichen bearbeitet. Wie in Kapitel 5.6.4 gezeigt, handelt es sich hierbei nur um Tendenzen. Die Unterschiede sind statistisch nicht signifikant.

Die Ergebnisse des Tests d2 sind teilweise mit den Ergebnissen von Canazei (Canazei 2013) vergleichbar, er konnte ebenfalls keine signifikanten Leistungssteigerungen bei dynamischem Licht messen. In dieser Studie wurden zwei nicht wahrnehmbare Helligkeitsveränderungen untersucht. Bei einem Lichtszenario veränderte sich innerhalb von 30 Minuten die Beleuchtungsstärke rhythmisch von 500 lux auf 2000 lux und bei dem zweiten Szenario innerhalb von zehn Sekunden von 500 lux auf 680 lux.

➔ Gibt es Unterschiede bei der Aktivität des ANS zwischen den verschiedenen Szenarien? Kann man durch Analyse der Herzratenvariabilität nachweisen, dass die dynamischen Lichtszenarien mehr aktivieren als das statische Licht?

Es wurden geringe Unterschiede in der HRV gemessen. Während des Tests d2 unterscheidet sich keines der Lichtszenarien von den anderen. Während des Kreativitätstests wurde bei den beiden dynamischen Szenarien eine höhere Herzfrequenz gemessen. Wie erwartet, wurde auch ein tendenziell höherer Wert des pNN50 während des statischen Szenarios gegenüber den Werten bei *schnell hell* ($p = 0,12$) und *schnell dunkel* ($p = 0,06$) gemessen. Ein hoher pNN50 (hohe HRV) deutet auf einen hohen Parasympathikuseinfluss hin, also waren die Probanden während der statischen Beleuchtung weniger aktiviert. Alle weiteren Parameter der HRV unterscheiden sich allerdings zwischen den einzelnen Lichtszenarien nicht signifikant. Es konnte in dieser Studie also nur teilweise nachgewiesen werden, dass die untersuchten dynamischen Lichtszenarien mehr aktivieren als

statisches Licht. Eine Studie von Canazei (Canazei 2013) prüfte ebenfalls die Auswirkungen auf die HRV. Bei der zehn Sekunden Rhythmik wurde, wie in der vorliegenden Studie, ein höherer Sympathikuseinfluss als bei statischem Licht festgestellt. Im Gegensatz dazu hat die langsamere Dynamik, welche sich innerhalb von 30 Minuten erhöht und abgesenkt hat, das parasympathische System angesprochen und deshalb zur Entspannung beigetragen. Die in der vorliegenden Studie getestete Dynamik veränderte sich innerhalb von 24 Sekunden merkbar schnell und nicht wahrnehmbar langsam innerhalb von 2 Minuten und 25 Sekunden. Die Geschwindigkeit ist also langsamer als die zehn Sekunden Rhythmik von Canazei. Vermutlich sind deshalb in der vorliegenden Studie die aktivierenden Effekte auf den Sympathikus zwar ebenfalls vorhanden, aber geringer als bei Canazei.

➔ Wie gut gefallen den Probanden die Lichtszenarien? Gefällt ihnen das schnell heller werdende Szenario besser als das schnell dunkler werdende oder das statische Licht?

Die durchschnittliche Bewertung der Lichtszenarien nach dem Gefallen ergibt zwischen dem statischen und schnell heller werdenden Szenario keinen Unterschied. Jedoch gibt es eine Tendenz, dass den Probanden das Szenario *schnell dunkel* nicht so gut gefallen hat, dieser Unterschied ist allerdings nicht signifikant.

Alle Lichtszenarien wurden durchschnittlich mit ungefähr 60 bis 70 auf einer Skala von *1 – gefällt gar nicht* bis *100 – gefällt sehr* bewertet. Da die Skala eine analoge Skala zum Markieren war, konnten die Probanden zwar alle Ausprägungen angeben, die Extremwerte an den beiden Enden der Skala wurden jedoch sehr selten markiert, was durch die generelle Vermeidung extremer Antworten bei Experimenten begründet sein könnte (Klug 2008). Dies trifft auch für bevorzugte Beleuchtungsstärken zu: Testpersonen, welche die Möglichkeit hatten, zwei unterschiedlich große Bereichen von Beleuchtungsstärken (0-500 lx und 0-700 lx) nach ihrem Vorlieben einzustellen, stellten sich kaum die beiden Extreme ein, sondern jeweils den mittleren Bereich (Uttley et al. 2013).

Aufgrund der beiden vorangegangenen Untersuchungen wurde ein besseres subjektives Gefallen der beiden dynamischen Szenarien erwartet. Dies konnte mit den Ergebnissen in dieser Untersuchung jedoch nicht nachgewiesen werden. In Abbildung 68 ist zu erkennen, dass Frauen tendenziell (n.s.) die dynamischen Szenarien schlechter und Männer besser als das statische Szenario bewerten. Möglicherweise haben sich die Frauen von der Dynamik eher gestört gefühlt, da sie mehr auf ihre Umgebung achten als Männer. Studien zeigen diese Unterschiede in der Beurteilung der Umgebung zwischen Männern und Frauen auf (Mohai 1997). Möglicherweise haben sich die Männer mehr auf die zu erfüllende Aufgabe konzentriert und deshalb weniger die Umgebung, also die variierende Beleuchtung, bemerkt. Weiterhin bevorzugten Männer leistungssteigernde Lichtsituationen mehr als Frauen (Knez und Enmarker 1998).

5.6.8 Weitere Ergebnisse

Nach den jeweiligen Versuchen wurde mit den Teilnehmern der Studie über den Versuch und die Ergebnisse gesprochen. In den Gesprächen wurden folgende Punkte genannt, die besonders erwähnenswert sind: Einige Probanden haben die Dynamik nicht bemerkt bzw. keinen Unterschied zwischen den drei Szenarien wahrgenommen. Beim Szenario *schnell hell* wurde es einzelnen Probanden zu schnell zu hell und sie fühlten sich im ersten Moment geblendet. Teilweise fühlten sich die Probanden von der Dynamik beim Test d2 gestört/abgelenkt. Einem Probanden gefiel das Licht nicht, weil die Farbtemperatur zu kalt war. Ein Proband merkt an, dass die „starken Schwankungen nerven“. Ein Proband hat ein Flimmern oder Flackern des Lichts wahrgenommen, was er als störend empfand.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

6.1 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen dieser Arbeit

Die Ergebnisse der Akzeptanzuntersuchungen zeigen, dass dynamisches Licht in der getesteten Ausprägung beliebter ist als statisches Licht. Zehn von zehn Probanden griffen bei der freien Wahl für ein bevorzugtes Licht auf dynamisches Licht zurück.

Sowohl aus der Probandenbefragung als auch aus der Studie zur örtlichen Lichtdynamik (Virtual-Sky-Studie) geht hervor, dass für konzentrierte Arbeiten statisches Licht ähnlich einem bedeckten, aber hellen Mittagshimmel bevorzugt wird. Bei kreativen Tätigkeiten wird hingegen dynamisches Licht wie bei einem leicht bewölkten Himmel bevorzugt. Die Ergebnisse der Virtual-Sky-Studie legen den Schluss nahe, dass ein animierter Wolkenhimmel in den Ausprägungen wie in Kapitel 4.3. beschrieben über die Dauer eines Arbeitstages der subjektiven Ermüdung der Probanden entgegenwirkt. Ob sich bestimmte Eigenschaften des simulierten Wolkenhimmels isolieren lassen (wie z. B. die Phasen des Hellerwerdens oder andere Effekte) und welche Eigenschaften für die Verzögerung der Ermüdung verantwortlich waren, konnte in der folgenden Studie zur zeitlichen Lichtdynamik noch nicht endgültig bestimmt werden. Die Hypothese, dass dieser Effekt durch die heller werdenden Abschnitte bei den Lichtwechseln erzeugt wird, konnte nicht bestätigt werden. Das Auftreten von Monotonie könnte ebenfalls eine Ursache gewesen sein: Möglicherweise wirkt statisches Licht im Vergleich zu dynamischer Beleuchtung erst nach ein paar Stunden monoton und langweilig, wohingegen ultradiane dynamische Beleuchtung abwechslungsreicher und interessanter wirkt und dadurch der ermüdende Effekt von statischem Licht größer wird. Diese Hypothese würde die Studienergebnissen von Canazei (Canazei 2013) erklären: Eine Rhythmik des Lichts wurde von Probanden „weniger ermüdend, interessanter und anregender“ erlebt. Bei der Studie mit örtlich dynamischer Beleuchtung mit dem

Virtual-Sky waren die Probanden der Lichtbedingung über einen ganzen Tag ausgesetzt, bei der Studie zur zeitlichen Lichtdynamik hingegen nur wenige Minuten. Da im Gegensatz zur Virtual-Sky-Studie mit den in der Studie zur zeitlichen Lichtdynamik verwendeten Lichtszenarien über die kurze Dauer von jeweils acht Minuten keine signifikanten Effekte der Beleuchtung auf die Probanden festgestellt werden konnte, tritt möglicherweise entgegen der Erwartung ein Effekt von dynamischem Licht erst nach mehreren Stunden oder Tagen ein.

Die in Kapitel 2 erwähnten Studien, welche ebenfalls Lichtwirkungseffekte durch Helligkeitsveränderungen festgestellt haben, lassen die induktive Schlussfolgerung zu, dass alle Helligkeitsveränderungen einer Müdigkeit entgegenwirken. Durch die hier durchgeführte Studie zur zeitlichen Lichtdynamik konnte dies jedoch nicht eindeutig bestätigt werden.

Zusammenfassend können die eingangs gestellten Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden:

- ➔ Finden ultradiane Lichtdynamiken bei der Wissensarbeit Akzeptanz und welche Ausprägungen von ultradianen Lichtdynamiken werden bei der Wissensarbeit einer unveränderlichen statischen Lichtsituation vorgezogen?

Wahrnehmbare Lichtveränderungen mit Farbtemperatur und Helligkeitswechsel werden gegenüber statischem Licht vorgezogen. Dies trifft besonders bei kreativen Tätigkeiten zu und wenn die Lichtexposition über einen ganzen Tag andauert.

- ➔ Lenkt ultradianes dynamisches Licht bei Arbeiten, die eine hohe Konzentration erfordern, ab? Nein, während der Experimente dieser Arbeit können sich Probanden bei statischem Licht weder besser konzentrieren noch werden sie durch dynamisches Licht abgelenkt. Dynamisches Licht beeinflusst zwar nicht die Leistungsfähigkeit, es wird aber bei Arbeiten, die eine hohe Konzentration erfordern, subjektiv eher abgelehnt.

- ➔ Kann ultradiane dynamische Beleuchtung die subjektive Müdigkeit am Tage reduzieren?

Ja, wenn die Lichtapplikation wie bei der Virtual-Sky-Studie (Kapitel 4) über einen ganzen Arbeitstag angewendet wird, verlangsamt sich die Ermüdung im Laufe eines Arbeitstages gegenüber statischem Licht. Bei kurzer Anwendungsdauer konnten in dieser Arbeit keine Effekte festgestellt werden.

- ➔ Kann ultradiane dynamische Beleuchtung psychologisch und physiologisch aktivieren?

Dynamisches Licht kann in einer Ausprägung wie bei der Virtual-Sky-Studie und bei Anwendung über einen Arbeitstag der Abnahme von Befindlichkeiten, welche einer Aktivierung zuzuordnen sind, entgegenwirken. Bei kurzer Lichtexposition können diese subjektiven Effekte nicht festgestellt werden. Je müder die Probanden bei Versuchsbeginn waren, desto größer war der aktivierende Effekt der Beleuchtung. Ein größerer Zusammenhang (n.s.) ist bei dynamischem Licht zu erkennen. Zur Objektivierung einer

Aktivierung der Probanden wurde während des Experiments mit der kurzen Lichtexposition die Herzratenvariabilität gemessen. Während des statischen Szenarios hatten die Probanden beim Kreativitätstest einen signifikant niedrigeren Durchschnittspuls als während der beiden dynamischen Lichtszenarien. Folglich waren sie während des dynamischen Lichts physiologisch aktiver. Die Werte des pNN50 zeigen ebenfalls einen höheren Sympathikuseinfluss während des dynamischen Lichts, was ebenfalls auf eine Aktivierung hindeutet. Diese Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass dynamisches Licht aktivieren kann. Beim konzentrierten Arbeiten wurde dieser Zusammenhang jedoch nicht festgestellt.

➔ Kann ultradiene dynamische Beleuchtung die subjektiven Befindlichkeiten verändern?

Ja, dynamisches Licht in einer Ausprägung wie bei der Virtual-Sky-Studie und bei Anwendung über einen Arbeitstag wirkt einer Abnahme von positiven Befindlichkeiten entgegen. Kurzfristig können dynamische Lichtszenarien, wie in Kapitel 5 untersucht, die subjektiven Befindlichkeiten der Probanden jedoch weder im positiven noch in negativem Sinne beeinflussen. Möglicherweise setzt eine Wirkung erst nach längerer Einwirkdauer ein. Insgesamt war das Wohlbefinden der Probanden hier jedoch sehr groß.

➔ Existieren differentielle Effekte bezüglich Art der Tätigkeit? Kann ultradiene dynamische Beleuchtung die kognitive Konzentrationsleistung und die Kreativität verbessern?

Nein, Leistungen, die Konzentration oder Kreativität erfordern, bleiben unter den in dieser Arbeit getesteten Lichtbedingungen gleich. Dynamisches Licht wird zwar bei kreativen Tätigkeiten bevorzugt, es fördert aber weder die Konzentration noch die Kreativität. Die dynamischen Lichtszenarien hatten bei einem Kreativitätstest keinen direkten Einfluss auf Kreativität. Nicht auszuschließen ist jedoch, dass die Kreativität erst durch eine längere dynamische Lichtexposition als nur wenige Minuten gefördert wird, da statisches Licht möglicherweise erst über einen langen Zeitraum beginnt durch Monotonie die Kreativität zu hemmen.

6.2 Empfehlungen zur menschenorientierten Beleuchtung

Basierend auf dem Stand der Wissenschaften (Kapitel 2.5 und Kapitel 2.7) können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden. Je nach gewünschter Wirkung der Beleuchtung können die Menschen mit aktivierendem oder beruhigendem Licht im Arbeitsalltag unterstützt werden, wobei die Sehaufgabe dabei nicht vernachlässigt werden darf. Wie in Kapitel 2.5 gezeigt, beruht dabei die Unterstützung der Arbeit auf drei grundlegenden Prinzipien. Diese Prinzipien entsprechen den Lichtbedürfnissen des Menschen: zirkadian, visuell und emotional. Geeignet zur Bestimmung einer optimalen Lichtbedingung ist möglicherweise eine Gewichtung bzw. Priorisierung der Aufgaben, welche das Licht erfüllen soll. Beispielsweise ist die Aufgabe des Lichts in der Pause für Entspannung

und Wohlbefinden zu sorgen, somit steht die emotionale Lichtwirkung im Vordergrund. Bei der Bildschirmarbeit hingegen stehen Konzentration, Sehaufgabe und Gesundheit im Vordergrund. Hier sollte also die zirkadiane Wirkung im Vordergrund stehen, ohne dabei die Sehaufgabe zu beeinflussen. Bei einem Brainstorming hat wiederum die Kreativität Priorität gegenüber der zirkadianen Wirksamkeit. Es kann folglich entsprechend der Literatur z. B. ein dunkleres Licht oder entsprechend der Ergebnisse dieser Arbeit eine ultradiane Lichtdynamik gewählt werden. Im Anschluss an die Priorisierung kann also auf Basis von Kapitel 2.5 und 2.7 die Lichtbedingung hinsichtlich Lichtfarbe, -stärke und -verteilung gewählt werden.

Aus Sicht des heutigen Standes der Wissenschaft und aus den Untersuchungen dieser Arbeit lassen sich zusammenfassend folgende Empfehlungen für menschenorientierte Beleuchtung ableiten:

- Ein 24h-Licht-Dunkel-Zyklus, der sich am natürlichen Tagesverlauf orientiert, sollte weitestgehend eingehalten werden
- Licht mit einer hohen Farbtemperatur wirkt physiologisch aktivierend und fördert die kognitive Leistung
- Die Farbtemperatur bzw. der Blauanteil und die Helligkeit jeder Lichtquelle sollte vor dem Schlafen gehen und in der Nacht reduziert werden
- Eine großflächige, diffuse Beleuchtung von oben unterstützt die aktivierende Wirkung
- Am Abend und in der Nacht kann die aktivierende Wirkung durch eine punktförmige Lichtquelle und durch Licht von unten weiter reduziert werden
- Ultradiane dynamische Lichtveränderungen können der Monotonie von statischer Beleuchtung entgegenwirken. Sie können sowohl die subjektiven Befindlichkeiten positiv beeinflussen als auch der Entstehung von Müdigkeit entgegenwirken. Besonders bei Tätigkeiten die Kreativität erfordern können sie eingesetzt werden. In dieser Arbeit konnte jedoch weder eine Veränderung der Kreativität noch der kognitiven Konzentrationsleistung durch Einwirkung ultradianer Lichtveränderungen nachgewiesen werden.
- Ultradiane dynamische Beleuchtung kann zwar als Beleuchtung bei der Wissensarbeit verwendet werden, die speziellen Wirkmechanismen müssen aber noch genauer untersucht werden.

Um deduktiv schlusszufolgern, ob sich Lichteigenschaften wie z. B. die heller werdenden Abschnitte isolieren lassen, um einer Ermüdung entgegenzuwirken, oder ob der Virtual-Sky nur in seiner Gesamtheit einer subjektiven Ermüdung entgegenwirkt, muss durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

7. Ausblick

In einer weiterführenden Studie wird die Auswirkung des künstlich animierten Wolkenhimmels auf das EEG (Elektroenzephalogramm) im Chronobiologie-Labor der Universitären Psychiatrischen Kliniken in Basel untersucht. Dazu wurden Teile des Virtual-Skys in einem der Schlaflabore aufgebaut.

Da die erkennbare Dynamik des Lichts einige Probanden gestört hat, könnte man in Zukunft das Verhältnis des direkten zum indirekten Licht so variieren bzw. ausgleichen, dass trotz dynamischer Beleuchtung eine konstante Beleuchtungsstärke auf dem Tisch entsteht, die bei schriftlichen Aufgaben nicht stört, da sie nicht auf dem Schreibtisch auftritt, sondern nur im peripheren Sichtfeld an der Decke.

Die Zufälligkeit der Lichtveränderung könnte eine weitere Ursache für die Verlangsamung der Ermüdung gewesen sein. Möglicherweise ließe sich durch eine scheinbar zufällige Änderung der Beleuchtungsstärke die Aktivierung und die Performanz steigern, da solche Effekte mit auditiven Stimuli festgestellt wurden (Mager et al. 2009). Dieser Einfluss der Zufälligkeit auf die kognitive Leistung sollte genauer untersucht werden.

Eine weitere dynamische Lichtveränderung mit deutlich höheren Frequenzen als die in dieser Arbeit behandelten Frequenzen könnten ebenfalls Wirkungen auf den Menschen haben. Sogenannte Steady-state Visual Evoked Potentials (SSVEPs), also kontinuierliche visuell evozierte Potentiale, geben einen Hinweis auf den Zusammenhang zwischen rhythmischen Lichtimpulsen und den menschlichen Gehirnwellen. Die SSVEPs sind bei der Elektroenzephalografie registrierbare elektrische Potenzialveränderungen im Gehirn mit einer Frequenz von beispielsweise 10 Hz, welche durch wiederholte visuelle Stimuli im selben Frequenzbereich hervorgerufen werden (Keil et al. 2003). Ob eine frequenzmodulierte Lichtstimulation in solchen Frequenzbereichen die kognitive Leistung erhöhen kann, ist eine weitere wissenschaftliche Fragestellung.

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4	Abbildung 21: Veränderung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch durch die Animierten Wolken ohne direkte Beleuchtung.....	50
Abbildung 2: Lichttechnische Grundgrößen	7	Abbildung 22: Veränderung der Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch durch die animierten Wolken inklusive direkte Beleuchtung. Die Modulation beträgt 26% (Lichtbedingung HD)	50
Abbildung 3: Spektren gebräuchlicher Leuchtmittel im Vergleich zu Tageslicht (von Hell nach Dunkel: Leuchtstoffröhre, Weiß-LED, Tageslicht, Glühlampe). 8		Abbildung 23: Lichteigenschaften auf dem Schreibtisch bei den drei Versuchsbedingungen.....	51
Abbildung 4: Lichtwirkungen über das Auge.....	11	Abbildung 24: spektrale Strahlungsverteilung bei der Virtual-Sky-Studie. Der aktivierende Blauanteil ist bei allen drei Bedingungen gleich.	51
Abbildung 5: Spektrale Empfindlichkeiten der Rezeptoren im Auge. Alle Spektren sind normiert, um eine integrierte Fläche von 100 % zu geben (Mod. nach (Lucas et al. 2014)). Die Absorptionskurven basieren auf (Govardovskii et al. 2000).	11	Abbildung 25: Leuchtdichten bei Virtual-Sky-Studie.....	53
Abbildung 6: Lichtwirkungen über das menschliche Auge (Mod nach (Boyce 2014))	13	Abbildung 26: Leuchtdichten bei der Virtual-Sky-Studie. die Leuchtdichten sind in cd/m ² Farblisch kodiert: Links von 3,2 cd/m ² (Dunkelblau) bis 254,6 CD/m ² (weiß), Rechts von 16 CD/m ² (Dunkelblau) bis 1134 CD/m ² (weiß)	53
Abbildung 7: Flächiges Licht belichtet einen größeren Teil der Netzhaut als punktförmiges und bewirkt vermutlich eine stärkere melatoninsuppression	25	Abbildung 27: der rechte, dunklere Balken zeigt die Werte für die Schnelle dynamik, der Linke, hellere Balken zeigt die Werte für das statische Licht.....	55
Abbildung 8: Licht von oben belichtet den unteren teil der retina und bewirkt eine stärkere melatoninsuppression	25	Abbildung 28: Subjektive Müdigkeit am Morgen und Schlafdauer in Abhängigkeit vom Wochentag und der Schlafdauer. Es besteht eine negative Korrelation von $r = -0,33$ zwischen Schlafdauer und Müdigkeit am Morgen.....	61
Abbildung 9: Nutzung von Einstellbarer Farbtemperatur: Gemessene Mittelwerte über zwei Jahre.....	30	Abbildung 29: Subjektive Müdigkeit Am Morgen der einzelnen Versuchstage	62
Abbildung 10: Vorversuch zu dynamischer Beleuchtung mit dem Beleuchtungspanel "Heliosity"	35	Abbildung 30: Ergebnisse der VAS: Keine Korrelation von Wochentag oder Lichtbedingung auf das Gefallen des Lichts	64
Abbildung 11: Spektrale Strahldichtevertelung und Varianz des Spektrums von Heliosity.....	35	Abbildung 31: Ergebnisse der VAS bei Kreativer Arbeit: HD gefällt am besten ($p = 0,002$).....	65
Abbildung 12: Das Interesse ist beim ersten Versuch zum ersten Zeitpunkt am höchsten	38	Abbildung 32: Ergebnisse der VAS bei konzentrierter Arbeit: Das statische Licht gefällt tendenziell (n.s.) am besten	65
Abbildung 13: Subjektiv Bevorzugtes Licht.....	41	Abbildung 33: Tagesverlauf der Befindlichkeiten bei S. 66	
Abbildung 14: Bevorzugte Lichtstimmungen	43	Abbildung 34: Tagesverlauf der Befindlichkeiten HD....	67
Abbildung 15: Bevorzugte Lichtstimmungen nach Art der Tätigkeit (n = 50).....	43	Abbildung 35: Tendenziell größte Müdigkeit und geringste Wachheit bei S am Ende des Tages.	68
Abbildung 16: Die Karolinska Sleepiness Scale (KSS).....	45	Abbildung 36: Vergleich der Befindlichkeiten „voller Energie“, „energielos“ der drei Lichtbedingungen..	68
Abbildung 17: Visuelle Analogskala (VAS)	45		
Abbildung 18: Versuchsanordnung bei der Virtual-Sky Studie	47		
Abbildung 19: Horizontale Beleuchtungsstärke am Fenster.....	47		
Abbildung 20: Raumtemperatur	47		

Abbildung 37: Dimension Aktiviertheit und Energielosigkeit (Summe von Befindlichkeiten) für die drei Lichtbedingungen	69	Abbildung 59: Ergebnisse der Karolinska Sleepiness Scale vor dem Versuch und nach den einzelnen Durchgängen	95
Abbildung 38: Befindlichkeiten um 17:00 Uhr nach sieben Stunden Versuchsdauer	70	Abbildung 60: Differenz KSS-Wert Vor dem Versuch - schnell hell, aufgetragen über den KSS-Wert vor dem Versuch	96
Abbildung 39: Abnahme der Befindlichkeitsdimension gehobene Stimmung von morgens bis abends, bei HD nimmt die gehobene Stimmung am wenigsten ab...	71	Abbildung 61: Differenz KSS-Wert Vor dem Versuch - schnell dunkel, aufgetragen über den KSS-Wert vor dem Versuch	96
Abbildung 40: Müdigkeit um 17:00 Uhr auf der Karolinska Sleepiness Scale	72	Abbildung 62: Differenz KSS-Werts Vor dem Versuch – Statisch, aufgetragen über den KSS-Wert vor dem Versuch	97
Abbildung 41: Ab- bzw. Zunahme der Dimensionen Aktiviertheit und Energielosigkeit.....	72	Abbildung 63: Verteilung der erreichten Punktzahlen beim TSD-Z in den drei aufeinanderfolgenden Durchgängen	98
Abbildung 42: Vorschlag zur Nutzung Ultradianer Lichtdynamik nach art der Tätigkeit	78	Abbildung 64: Verteilung der erreichten Punktzahlen des TSD-Z während der verschiedenen Lichtszenarien ..	98
Abbildung 43: Optimierte Lichtdynamik z. Aktivierung.	79	Abbildung 65: Anzahl bearbeiteter Zeichen im Test d2	99
Abbildung 44: Ausschnitt aus Testblatt des Tests d2	83	Abbildung 66: Prozentualer Fehleranteil im Test d2 sortiert nach Lichtbedingung	100
Abbildung 45: Variante A, B und C des TSD-Z.....	83	Abbildung 67: Ergebnisse VAS nach Lichtbedingung ..	102
Abbildung 46: Versuchsanordnung	86	Abbildung 68: Ergebnisse der VAS nach Lichtbedingung und Geschlecht	102
Abbildung 47: Versuchsanordnung in Vorderansicht....	86		
Abbildung 48: Versuchsanordnung in Draufsicht	87		
Abbildung 49: Versuchsaufbau in Seitenansicht von rechts.....	87		
Abbildung 50: Veränderung der Beleuchtungsstärke der drei Lichtszenarien	88		
Abbildung 51: Relative spektrale Strahlungsverteilung.	89		
Abbildung 52: Effektive Beleuchtungsstärke der einzelnen Photopigmente	90		
Abbildung 53: Ergebnisse des MDBF in den drei Kategorien nach schnell hell.....	92		
Abbildung 54: Ergebnisse des MDBF in den drei Kategorien nach schnell dunkel.....	92		
Abbildung 55: Ergebnisse des MDBF in den drei Kategorien nach statisch	93		
Abbildung 56: Durchschnittswerte der MDBF-Scores für alle Lichtszenarien sowie vor dem Versuch.....	93		
Abbildung 57: Müdigkeit auf der Karolinska Sleepiness Scale vor dem Versuch und nach den einzelnen Szenarien.	94		
Abbildung 58: Differenzen der KSS-Werte vor dem Versuch zu nach den Lichtszenarien.....	95		

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lichttechnische Grundgrößen.....	6
Tabelle 2: Ablauf des Vorversuchs zur Akzeptanz von Ultradianen Lichtdynamiken	36
Tabelle 3: Lichtbedingungen und Versuchspersonen....	36
Tabelle 4: Bestrahlungsstärke, gewichtet mit den Empfindlichkeiten der fünf Photorezeptoren im Auge bei Statisch (S) und seltener Dynamik (LD).....	55
Tabelle 5: Bestrahlungsstärke, gewichtet mit den Empfindlichkeiten der fünf Photorezeptoren im Auge bei Schneller Dynamik (HD)	56
Tabelle 6: Vergleich des Melanopischen Wirkfaktors und der melanopischen tageslicht-äquivalenten Beleuchtungsstärke bei der Virtual-Sky-Studie	56
Tabelle 7: Randomisierte Reihenfolge der Lichtbedingungen	59
Tabelle 8: Liste der anonymisierten Teilnehmer	60
Tabelle 9: Signifikante Unterschiede der Befindlichkeiten zwischen S und HD	69
Tabelle 10: Kenngrößen, die bei der Auswertung der HRV berücksichtigt werden.....	81
Tabelle 11: Ergebnisse der Herzratenvariabilität während dem Test d2 und dem Kreativitätstest (n=33)	101

Formelverzeichnis

Formel 1: Visuell bewertete Strahlungsgröße	20
Formel 2: Melanopisch bewertete Strahlungsgröße	20
Formel 3: melanopischer Wirkungsfaktor	20
Formel 4: melanopischer Wirkungsfaktor	20
Formel 5: melanopische tageslicht-äquivalente lichttechnische Größe.....	21
Formel 6: melanopische tageslicht-äquivalente lichttechnische Größe.....	21
Formel 7: Tageslichtquotient	22
Formel 8: Berechnung der Modulation	50
Formel 9: Berechnung der Blendung mit Hilfe des UGR- Verfahrens.....	52
Formel 10: Fallzahlkalkulation.....	57
Formel 11: Prozentualer Fehleranteil beim Test d2	99

Abkürzungsverzeichnis

λ_u, λ_o : Grenzwellenlängen für den

Empfindlichkeitsbereich

a(mel, v): melanopische Wirkungsfaktor

ANOVA: Analysis of Variance

ANS: autonomes Nervensystem

ANT: Attention Network Test

BFS: Befindlichkeitsfragebogen

bzw.: beziehungsweise

cd/m: Candela pro Quadratmeter

CSV: comma-separated values

CTVT: Competence Team Visual Technologies

D: Tageslichtquotient

d.h.: das heißt

DGUV: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

DIN: Deutsches Institut für Normung e.V.

Dipl.-Ing.: Diplom-Ingenieur

DMX: Digital Multiplex

Dr.-Ing.: Doktor-Ingenieur

E: Beleuchtungsstärke

e.V.: eingetragener Verein

EEG: Elektroenzephalografie

EOG: Elektrooculogramm

ERP: Event Related Potential

etc: et cetera

F: F-Wert

HCL: Human Centric Lighting

HD: schnelle Dynamik

HF: high frequency

HID: high-intensity discharge

HRV: Herzratenvariabilität

Hz: Hertz

I: Lichtstärke

IAO: Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation

IBM: International Business Machines

Ind.: individuell

ipRGC: intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cell

ITZ: Innovations- und Technologiezentrum

K: Kelvin

K(mel, D65): Melanopisches Tageslichtäquivalent

K_m: Maximalwert Photometrisches

Strahlungsäquivalent für Tagsehen = 683 lm/W

KAN: Kommission Arbeitsschutz und Normung

KSS: Karolinska Sleepiness Scale

L: Leuchtdichte

Laser: light amplification by stimulated emission of radiation

Lc: long wavelength sensitive cones

LD: Langsame Dynamik

LED: Licht emittierende Diode

LF: low frequency

lx: Lux

M: Modulation

MD: Mittlere Dynamik

MDBF: Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen

min: Minuten

MMN: Mismatch-Negativity

Mod.: modifiziert

n: Anzahl der Probanden

n.s.: nicht signifikant

nm: Nanometer

o.ä.: oder ähnliches

OLED: organic light emitting diode

OLIVE: Optimierte Lichtsysteme zur Förderung der Leistungsfähigkeit und Gesundheit

OS: operating system

p: p-Wert

PC: Personal Computer

PKW: Personenkraftwagen

pNN50: Prozentsatz der aufeinanderfolgenden RR-Werte, die sich um mehr als 50 ms voneinander unterscheiden

Prof.: Professor

PVT: psychomotorischer Vigilanztest

r: rods

Ra: allgemeiner Farbwiedergabeindex

REM: rapid eye movement

RGB: Rot Grün Blau

rMSSD: root mean square of successive differences

RR: RR-Wert Dauer einer elektrischen Herzaktion

s: Sekunde

S: Statisch

smel (λ): Wirkungsspektrum für die betrachtete
 melanopische Wirkung, bezogen auf den
 Maximalwert smel, max = 1
 sc: short wavelength sensitive cones
 SCN: suprachiasmatic nucleus
 SD: Schnelle Dynamik 38; Standard Deviation
 SPEC: Erarbeitung von Spezifikationen
 SPSS: Statistical Package for the Social Science
 sr: Steradian
 TSD-Z: Test zum schöpferischen Denken - zeichnerisch
 URG: Unified Glare Rating
 UV: ultraviolett
 $V(\lambda)$: spektrale Hellempfindlichkeitsgrad
 VAS: visuelle Analogskala

vgl.: vergleiche
 VGZ: Verfahren zur Erfassung des Gemütszustandes
 VP: Versuchsperson
 W: Watt
 $X(v, mel, D65)$: Melanopisch bewertete
 (tageslichtäquivalente) lichttechnische Größe
 X_{mel} : melanopisch bewertete Strahlungsgröße
 $X\lambda (\lambda)$: spektrale strahlungsphysikalische Größe
 Z: melanopsinhatige Ganglienzellen
 z.B.: zum Beispiel
 ZNL: Zentrum für Neurowissenschaften und Lernen
 δ : Effektgrösse
 Φ : Lichtstrom

Literaturverzeichnis

- Abele-Brehm, A.; Brehm, W. (1986): Zur Konzeptualisierung und Messung von Befindlichkeit. Die Entwicklung der "Befindlichkeitsskalen" : (BFS). In: *Diagnostica* 32 32 (3), S. 209–228.
- Akerstedt, T.; Gillberg, M. (1990): Subjective and objective sleepiness in the active individual. In: *The International journal of neuroscience* 52 (1-2), S. 29–37.
- Ámundadóttir, M. L. (2016): Light-driven model for identifying indicators of non-visual health potential in the built environment. Dissertation. École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Apple (2016): SelfLoops HRV. Online verfügbar unter <https://itunes.apple.com/us/app/selfloops-hrv/id921130546?mt=8>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- Aschoff, Jürgen; King, Frederick A.; Adler, Norman T. (1981): Biological Rhythms. New York, London: Plenum Press.
- Badia, P.; Myers, B.; Boecker, M.; Culpepper, J.; Harsh, J.R. (1991): Bright light effects on body temperature, alertness, EEG and behavior. In: *Physiology & Behavior* 50 (3), S. 583–588. DOI: 10.1016/0031-9384(91)90549-4.
- Bartenbach, C.; Witting, W. (2009): Handbuch für Lichtgestaltung. Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen. Wien: Springer.
- Benya, J.; Schwartz, P. (2003): Advanced lighting guidelines. White Salmon, WA: New Buildings Institute.
- Berson, D. M.; Dunn, F. A.; Takao, M. (2002): Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. In: *Science* 295 (5557), S. 1070–1073. DOI: 10.1126/science.1067262.
- Beute, F.; de Kort, Y. A. W. (2014): Salutogenic effects of the environment: review of health protective effects of nature and daylight. In: *Applied psychology: Health and well-being* 6 (1), S. 67–95. DOI: 10.1111/aphw.12019.
- Bilan, A.; Witczak, A.; Palusiński, R.; Myśliński, W.; Hanzlik, J. (2005): Circadian rhythm of spectral indices of heart rate variability in healthy subjects. In: *Journal of electrocardiology* 38 (3), S. 239–243.
- Birren, F. (1950): Color Psychology and Color Therapy. 1. Aufl. New York: McGraw-Hill.
- Blask, D. E.; Wilson, S. T.; Zalatan, F. (1997): Physiological melatonin inhibition of human breast cancer cell growth in vitro: evidence for a glutathione-mediated pathway. In: *Cancer research* 57 (10), S. 1909–1914.

Blask, David E. (2009): Melatonin, sleep disturbance and cancer risk. In: *Sleep Medicine Reviews* 13 (4), S. 257–264. DOI: 10.1016/j.smr.2008.07.007.

Bortz, Jürgen; Schuster, Christof (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Boyce, P.; Hunter, C.; Howlett, O. (2003): The Benefits of Daylight through Windows. Lighting Research Center. Troy, New York.

Boyce, P. R. (2014): Human Factors in Lighting. 3. Aufl. Hoboken: Taylor and Francis. Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1566006>.

Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D. (2001): Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. In: *Journal of Neuroscience* 21 (16), S. 6405–6412.

Brainard, G. C.; Rollag, M. D.; Hanifin, J. P.; van den Beld, G.; Sanford, B. (2000): The effect of polarized versus nonpolarized light on melatonin regulation in humans. In: *Photochemistry and Photobiology* 71 (6), S. 766–770. DOI: 10.1562/0031-8655(2000)0710766TEOPVN2.0.CO2.

Brickenkamp, R. (1981): Test d 2. Aufmerksamkeits-Belastungs-Test ; Handanweisung ; Durchführung, Auswertung, Interpretation. 7. Aufl. Göttingen, Toronto, Zürich: Hogrefe.

Burke Miller Thayer: Daylighting and productivity at Lockheed. A daylit office building near San Francisco adds to corporate profits through energy saving and improved productivity. In: *Solar Today*, May/Juni 1995, S. 22–29. Online verfügbar unter <http://www.bristolite.com/Interfaces/media/Lockheed%20Martin%20Productivity%20Study%201983.pdf>, zuletzt geprüft am 25.09.2014.

Cajochen, C.; Frey, S.; Anders, D.; Späti, Ja.; Bues, M.; Pross, A. et al. (2011): Evening exposure to a light emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. In: *JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY* 110 (5), S. 1432–1438. Online verfügbar unter <http://www.biomedsearch.com/nih/Evening-exposure-to-light-emitting/21415172.html>.

Cajochen, C.; Zeitzer, J. M.; Czeisler, C. A.; Dijk, D. J. (2000): Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. In: *Behavioural brain research* 115 (1), S. 75–83.

Camm, A. (1996): Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. In: *European heart journal* (17), S. 354–381.

Campbell, S. S.; Dawson, D. (1990): Enhancement of nighttime alertness and performance with bright ambient light. In: *Physiology & Behavior* 48 (2), S. 317–320. DOI: 10.1016/0031-9384(90)90320-4.

Canazei, M. (2013): Laborexperiment zur Beeinflussung der Produktivität durch dynamische Lichteinwirkung. Hg. v. Zumtobel Research. Online verfügbar unter http://www.zumtobel.com/PDB/teaser/DE/Study_Industry_and_Engineering_Productivity_Lego.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2015.

Chellappa, S. L.; Gordijn, M. C. M.; Cajochen, C. (2011): Can light make us bright? Effects of light on cognition and sleep. In: *Progress in Brain Research* 190, S. 119–133. DOI: 10.1016/B978-0-444-53817-8.00007-4.

Chellappa, S. L.; Steiner, R.; Oelhafen, P.; Lang, D.; Götz, T.; Krebs, J.; Cajochen, C. (2013): Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep. In: *Journal of Sleep Research* 22 (5), S. 573–580. DOI: 10.1111/jsr.12050.

Cornsweet, T. N.; Pinsker, H. M. (1965): Luminance discrimination of brief flashes under various conditions of adaptation. In: *The Journal of Physiology* 176 (2), S. 294–310. DOI: 10.1113/jphysiol.1965.sp007551.

Czeisler, C. A.; Kronauer, R. E.; Zeitzer, J. M.; Gronfier, C.; Wright, K. P.; Rimmer, D. (2001): Evaluation of Intermittent Bright Light Exposure as a Space Flight Countermeasure. Abschlussbericht. Online verfügbar unter http://lsda.jsc.nasa.gov/lsda_data/dataset_inv_data/Czeisler_NAG5-3952.pdf_BRC_NAG53952_2014_280_011055.pdf, zuletzt geprüft am 05.04.2017.

Dacey, Dennis M.; Liao, Hsi-Wen; Peterson, Beth B.; Robinson, Farrel R.; Smith, Vivianne C.; Pokorny, Joel et al. (2005): Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. In: *Nature* 433 (7027), S. 749–754. DOI: 10.1038/nature03387.

Dehoff, P. (Hg.) (2002): The impact of changing light on the well-being of people at work. 5th International Conference on Energy-Efficient Lighting. Nice, France, 29. - 31. Mai. Stockholm: Borg & Co. Online verfügbar unter http://www.eceee.org/library/conference_proceedings/RL5/session_14/dehoff/paper.

Ditzinger, T. (2013): Illusionen des Sehens. Eine Reise in die Welt der visuellen Wahrnehmung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Edelhäuser, F.; Hak, F.; Kleinrath, U.; Lühr, B.; Matthiessen, P. F.; Weinzirol, J.; Cysarz, D. (2013): Impact of Colored Light on Cardiorespiratory Coordination. In: *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine* 2013, S. 810876. DOI: 10.1155/2013/810876.

- Edwards, L.; Torcellini, P. A. (Hg.) (2002): A Literature Review of the Effects of Natural Light on Building Occupants. Technical Report (NREL/TP-550-30769). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Ehrenstein, W. (Hg.) (2002): Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen. Konsequenzen für Lichtnutzung und Lichttechnik. Symposium Licht und Gesundheit. Berlin, 21. 22. Februar 2002. Universität Hohenheim. Online verfügbar unter http://www.lichtundgesundheit.de/cyberlux/wp-content/uploads/2009/07/biologische_uhr.pdf, zuletzt geprüft am 15.04.2015.
- Enezi, Ja; Revell, V.; Brown, T.; Wynne, J.; Schlangen, L.; Lucas, R. (2011): A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights. In: *Journal of Biological Rhythms* 26 (4), S. 314–323. DOI: 10.1177/0748730411409719.
- Feist, A.; Stephan, E. (2007): Entwicklung eines Verfahrens zur Erfassung des Gefühlszustandes (VGZ). Fachgruppe Psychologie, Universität Köln. Saarbrücken. Online verfügbar unter <http://psydok.psycharchives.de/jspui/bitstream/20.500.11780/417/1/VGZ.pdf>, zuletzt geprüft am 05.04.2017.
- Figueiro, M. G.; Bierman, A.; Plitnick, B.; Rea, M. S. (2009): Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night. In: *BMC neuroscience* 10, S. 105. DOI: 10.1186/1471-2202-10-105.
- Fisch, J. (2000): Licht und Gesundheit. Das Leben mit optischer Strahlung. Literaturrecherche. Technische Hochschule Ilmenau, Ilmenau.
- Fischer, D. (1970): Optimale Beleuchtungsniveaus in Arbeitsräumen Teil 1+2 (22).
- Fleischer, S. E. (2001): Die psychologische Wirkung veränderlicher Kunstlichtsituationen auf den Menschen. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
- Foster, R. G.; Roenneberg, T. (2008): Human Responses to the Geophysical Daily, Annual and Lunar Cycles. In: *Current Biology* 18 (17), R784-R794. DOI: 10.1016/j.cub.2008.07.003.
- Fox, J. G. (1971): Background music and industrial efficiency-A review. In: *Applied Ergonomics* 2 (2), S. 70–73. DOI: 10.1016/0003-6870(71)90072-X.
- Fraunhofer IAO; Zumtobel Research (2014): Wahrgenommene Lichtqualität im Büro. Online verfügbar unter http://www.zumtobel.com/PDB/Ressource/teaser/de/com/Study_Office_Perceived_Lighting_Quality.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2016.

Fuchs, U.; Weyde, M. (2014): Technische Regeln für Arbeitsstätten 2015. Von der Praxis - für die Praxis. 1. Aufl. Bonn: VNR Verlag für die Deutsche Wirtschaft.

Gabel, V.; Maire, M.; Reichert, C. F.; Chellappa, S. L.; Schmidt, C.; Hommes, V. et al. (2013): Effects of artificial dawn and morning blue light on daytime cognitive performance, well-being, cortisol and melatonin levels. In: *Chronobiology international* 30 (8), S. 988–997. DOI: 10.3109/07420528.2013.793196.

Gabel, V.; Maire, M.; Reichert, C. F.; Chellappa, S. L.; Schmidt, C.; Hommes, V. et al. (2015): Dawn simulation light impacts on different cognitive domains under sleep restriction. In: *Behavioural brain research* 281, S. 258–266. DOI: 10.1016/j.bbr.2014.12.043.

Gifford, R.; Hine, D. W.; Veitch, J. A. (1997): Meta-Analysis for Environment-Behavior and Design Research, Illuminated with a Study of Lighting Level Effects on Office Task Performance. 4. Aufl. New York: Springer US. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-4425-5_7.

Giles, D.; Draper, N.; Neil, W. (2016): Validity of the Polar V800 heart rate monitor to measure RR intervals at rest. In: *European Journal of Applied Physiology* 116 (3), S. 563–571. DOI: 10.1007/s00421-015-3303-9.

Gilliam, J. E.; Unruh, D. (1988): The Effects of Baker-Miller Pink on Biological, Physical and Cognitive Behaviour. In: *Journal of Orthomolecular Medicine* 3 (4), S. 202–206. Online verfügbar unter <http://www.orthomolecular.org/library/jom/1988/pdf/1988-v03n04-p202.pdf>, zuletzt geprüft am 23.11.2015.

Glickman, Gena; Hanifin, John P.; Rollag, Mark D.; Wang, Jenny; Cooper, Howard; Brainard, George C. (2003): Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans. In: *Journal of Biological Rhythms* 18 (1), S. 71–79. DOI: 10.1177/0748730402239678.

Gooley, J. J.; Rajaratnam, S. M.; Brainard, G. C.; Kronauer, R. E.; Czeisler, C. A.; Lockley, S. W. (2010): Spectral responses of the human circadian system depend on the irradiance and duration of exposure to light. In: *Science Translational Medicine* 2 (31), S. 31. DOI: 10.1126/scitranslmed.3000741.

Gornicka, G. B. (2008): Lighting at work: environmental study of direct effects of lighting level and spectrum on psychophysiological variables. Technische Universität Eindhoven, Eindhoven.

Gronfier, Kronauer, Wright, Czeisler (2000): Phase-shifting effectiveness of intermittent light pulses: Relationship to melatonin suppression. In: *7th Meeting of the Society for Research on Biological Rhythms Jacksonville: Society for Research on Biological Rhythms*.

- Grote, V.; Kelz, C.; Goswami, N.; Stossier, H.; Tafeit, E.; Moser, M. (2013): Cardio-autonomic control and wellbeing due to oscillating color light exposure. In: *Physiology & Behavior* 114-115, S. 55–64. DOI: 10.1016/j.physbeh.2013.03.007.
- Haans, A.; Kort, Y. A.W. de (2012): Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. In: *Journal of Environmental Psychology* 32 (4), S. 342–352. DOI: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006.
- Hannibal, Jens; Christiansen, Anders Tolstrup; Heegaard, Steffen; Fahrenkrug, Jan; Kiilgaard, Jens Folke (2017): Melanopsin expressing human retinal ganglion cells. Subtypes, distribution, and intraretinal connectivity. In: *The Journal of comparative neurology* 525 (8), S. 1934–1961. DOI: 10.1002/cne.24181.
- Hathaway, W. E. (1995): Effects of School Lighting on Physical Development and School Performance. In: *The Journal of Educational Research* 88 (4), S. 228–242. DOI: 10.2307/27541979.
- Hattar, S.; Liao, H. W.; Takao, M.; Berson, D. M.; Yau, K. W. (2002): Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. In: *Science* 295 (5557), S. 1065–1070. DOI: 10.1126/science.1069609.
- Hébert, M.; Martin, S. K.; Lee, C.; Eastman, C. I. (2002): The effects of prior light history on the suppression of melatonin by light in humans. In: *Journal of pineal research* 33 (4), S. 198–203.
- Heschong, L. (2003): Daylight and Retail Sales. Technical report. Hg. v. California Energy Commission. Sacramento. Online verfügbar unter http://h-m-g.com/downloads/Daylighting/A-5_Daylgt_Retail_2.3.7.pdf, zuletzt geprüft am 06.04.2017.
- Hoffmann, G.; Leichtfried, V.; Griesmacher, A.; Bartenbach, C.; Canazei, M.; Staggl, S.; Schobersberger, W. (2008): Effects of Light With Reduced Short Wavelength Components on Parameters of Circadian Rhythm and Performance in an Experimental Night Shift Model. In: *The Open Physiology Journal* 1, S. 34–43. DOI: 10.2174/1874360900901010034.
- Hottenrott, K.; Hoos, O.; Esperer H. D. (2006): Herzfrequenzvariabilität im Sport. Aktueller Stand. In: *Herz Kardiovaskuläre Erkrankungen* 31 (6), S. 544–552. DOI: 10.1007/s00059-006-2855-1. <http://www.de-escalate.nl/>.
- Ings, Simon (2008): Das Auge. Meisterstück der Evolution. 1. Aufl. Hamburg: Hoffmann und Campe Verlag.
- Keep, P.; James, J.; Inman, M. (1980): Windows in the intensive therapy unit. In: *Anaesthesia* 35 (3), S. 257–262. DOI: 10.1111/j.1365-2044.1980.tb05093.x.

Khalsa, S. B. S.; Jewett, M. E.; Cajochen, C.; Czeisler, C. A. (2003): A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. In: *The Journal of Physiology* 549 (3), S. 945–952. DOI: 10.1113/jphysiol.2003.040477.

Klug, A. (2008): Antworttendenzen. Online verfügbar unter <http://klug-md.de/Wissen/Antworttendenzen.htm>, zuletzt aktualisiert am 2008, zuletzt geprüft am 10.02.2016.

Knez, I.; Enmarker, I. (1998): Effects of office lighting on mood and cognitive performance and a gender effect in work-related judgment. In: *Environment and behavior* 30 (4), S. 553–567. DOI: 10.1177/001391659803000408.

Kommission Arbeitsschutz und Normung (2015): KAN-Positionspapier zum Thema künstliche, biologisch wirksame Beleuchtung in der Normung. Hg. v. Verein zur Förderung der Arbeitssicherheit in Europa e.V. (VFA). Online verfügbar unter http://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Basisdokumente/de/Deu/KAN-Position_kuenstliche_biologisch_wirksame_Beleuchtung_2015.pdf, zuletzt geprüft am 22.12.2015.

Kort, Y. de; Smolders, K. (2010): Effects of dynamic lighting on office workers: First results of a field study with monthly alternating settings. In: *Lighting Research and Technology* 42 (3), S. 345–360. DOI: 10.1177/1477153510378150.

Krüger (Hg.) (2007): Visionen für eine bessere Beleuchtung. Licht- und Lebensqualität. Lüneburg, 19./20.4. Krüger.

Kubios HRV (2016). Version : Kubius. Online verfügbar unter <http://kubios.uef.fi/>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

Kutschmann, M.; Bender, R.; Grouven, U.; Berg, G. (2006): Aspects of Sample Size Determination and Power Calculation Illustrated on Examples from Rehabilitation Research. In: *Die Rehabilitation* 45 (6), S. 377–384. DOI: 10.1055/s-2006-940113.

Lasko, T. A.; Kripke, D. F.; Elliot, J. A. (1999): Melatonin suppression by illumination of upper and lower visual fields. In: *Journal of Biological Rhythms* 14 (2), S. 122–125. DOI: 10.1177/074873099129000506.

Lerner, A. B.; Case, J. D.; Takahashi, Y. (1960): Isolation of Melatonin and 5-Methoxyindole-3-acetic Acid from Bovine Pineal Glands. In: *The Journal of biological chemistry* 235 (7), S. 1992–1997.

Lesiuk, T. (2005): The effect of music listening on the quality-of-work of computer information systems developers. In: *Psychology of Music* 33 (2), S. 173–191. DOI: 10.1177/0305735605050650.

- Lesiuk, Teresa (2010): The effect of preferred music on mood and performance in a high-cognitive demand occupation. In: *Journal of music therapy* 47 (2), S. 137–154. DOI: 10.1093/jmt/47.2.137.
- Lewy, A. J.; Wehr, T. A.; Goodwin, F. K.; Newsome, D. A.; Markey, S. P. (1980): Light suppresses melatonin secretion in humans. In: *Science* 210 (4475), S. 1267–1269. DOI: 10.1126/science.7434030.
- DIN EN 12464-1, 2011-08: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten. Online verfügbar unter http://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/Leitfaden_DIN-EN-12464-1_2.Auflage_korr.pdf, zuletzt geprüft am 10.02.2015.
- LiTG, Deutsche Lichttechnik Gesellschaft e.V. (Hg.) (2016): Beleuchtungstechnik. Grundlagen. 4. Auflage. Berlin: Huss-Medien.
- Lockley, S. W.; Evans, E. E.; Scheer, F. A.; Brainard, G. C.; Czeisler, C. A.; Aeschbach, D. (2006): Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans. In: *Sleep* 29 (2), S. 161–168.
- Lucas, R. J.; Peirson, S. N.; Berson, D.; Brown, T.; Cooper, H.; Czeisler, C. A. et al. (Hg.) (2014a): Irradiance Toolbox. User Guide.
- Lucas, R. J.; Peirson, S. N.; Berson, D. M.; Brown, T. M.; Cooper, H. M.; Czeisler, C. A. et al. (2014b): Measuring and using light in the melanopsin age. In: *Trends in Neurosciences* 37 (1), S. 1–9. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.004.
- Luczak, H.; Volpert, W. (1997): Handbuch Arbeitswissenschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Machin, David (Hg.) (2009): Sample size tables for clinical studies. 3. Aufl. Chichester, UK, Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell.
- Mager, R.; Meuth, S. G.; Kräuchi, K.; Schmidlin, M.; Müller-Spahn, F.; Falkenstein, M. (2009): Mismatch and conflict: neurophysiological and behavioral evidence for conflict priming. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 21 (11), S. 2185–2194. DOI: 10.1162/jocn.2008.21154.
- Mathers, C. D.; Loncar, D. (2006): Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030. In: *PLoS medicine* 3 (11), S. e442. DOI: 10.1371/journal.pmed.0030442.
- Mehta, R.; Zhu, R.; Cheema, A. (2012): Is Noise Always Bad? Exploring the Effects of Ambient Noise on Creative Cognition. In: *J Consum Res* 39 (4), S. 784–799. DOI: 10.1086/665048.
- Mishima, K.; Okawa, M.; Hozumi, S.; Hishikawa, Y. (2000): Supplementary administration of artificial bright light and melatonin as potent treatment for disorganized circadian rest-activity and dysfunctional autonomic and neuroendocrine systems in institutionalized demented elderly persons. In: *Chronobiology international* 17 (3), S. 419–432. DOI: 10.1081/CBI-100101055.

- Mishima, K.; Okawa, M.; Shimizu, T.; Hishikawa, Y. (2001): Diminished melatonin secretion in the elderly caused by insufficient environmental illumination. In: *The Journal of clinical endocrinology and metabolism* 86 (1), S. 129–134. DOI: 10.1210/jcem.86.1.7097.
- Mohai, P. (1997): Gender Differences In The Perception Of Most Important Environmental Problems. In: *Race, Gender & Class Journal* 5 (1), S. 153–169.
- Muck, Erich; Bodmann, H.-W (1961): The importance of illumination level in practical visual performance. Hamburg: [publisher not identified].
- Näätänen, R.; Gaillard, A. W. K.; Mäntysalo, S. (1978): Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. In: *Acta Psychologica* 42 (4), S. 313–329. DOI: 10.1016/0001-6918(78)90006-9.
- Näätänen, R.; Tervaniemi, M.; Sussman, E.; Paavilainen, P.; Winkler, I. (2001): 'Primitive intelligence' in the auditory cortex. In: *Trends in Neurosciences* 24 (5), S. 283–288. DOI: 10.1016/S0166-2236(00)01790-2.
- Nakamura, H. (2013): Influence of Color Temperature on Preference of Atmosphere, and Air Temperature. Hg. v. Lux Pacifica. Bangkok, Thailand. Online verfügbar unter http://www.tieathai.org/luxpacific2013/images/stories/documents/Template_Full_Paper_Lux2009.pdf.
- Partonen, T.; Lönnqvist, J. (2000): Bright light improves vitality and alleviates distress in healthy people. In: *Journal of Affective Disorders* 57 (1-3), S. 55–61. DOI: 10.1016/S0165-0327(99)00063-4.
- Pedrotti, F.; Pedrotti, L.; Bausch, W.; Schmidt, H. (2005): Optik für Ingenieure. Grundlagen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Posner, M. I.; Petersen, S. E. (1990): The attention system of the human brain. In: *Annual review of Neuroscience* 13, S. 25–42. DOI: 10.1146/annurev.ne.13.030190.000325.
- Prigge, C. L.; Yeh, P. T.; Liou, N. F.; Lee, C. C.; You, S. F.; Liu, L. L. et al. (2016): M1 ipRGCs Influence Visual Function through Retrograde Signaling in the Retina. In: *The Journal of Neuroscience* 36 (27), S. 7184–7197. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3500-15.2016.
- Pross, A.; Stefani, O.; Bossenmaier, S.; Bues, M. (2015): LightWork. Benutzerakzeptanz und Energieeffizienz von LED-Beleuchtung am Wissensarbeitsplatz. Hg. v. W. Bauer. Fraunhofer IAO LightFusionLab. Stuttgart. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-343420.html>.

Provencio, I.; Rodriguez, I. R.; Jiang, G.; Hayes, W. P.; Moreira, E. F.; Rollag, M. D. (2000): A novel human opsin in the inner retina. In: *The Journal of Neuroscience* 20 (2), S. 600–605.

Provencio, I.; Rollag, M. D.; Castrucci, A. M. (2002): Photoreceptive net in the mammalian retina. This mesh of cells may explain how some blind mice can still tell day from night. In: *Nature* 415 (6871), S. 493. DOI: 10.1038/415493a.

Rea, M. S. (2002): Licht – Mehr als nur Sehen. Hg. v. Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium, The Lighting Research Office of the Electric Power Research Institute. Palo Alto, CA. 2002:1-15. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, New York. Online verfügbar unter http://www.cyberlux.de/deutsch/articles/l-h/beleuchtung/prof_rea/Licht.pdf, zuletzt geprüft am 13.04.2017.

Rehberg, K. (Hg.) (2006): Online- und Offlinevergleich visueller Analogskalen mit 4- und 8-stufig skalierten Likert-Skalen bei einem Fragebogen zum Verhalten in sozialen Gruppen. 32. Kongresses der Deutschen Gesellschaft für Soziologie. München. Frankfurt am Main: Campus Verlag GmbH.

Reichwald, R. (1978): Zur Notwendigkeit der Akzeptanzforschung bei der Entwicklung neuer Systeme der Bürotechnik. München: Hochschule der Bundeswehr (Die Akzeptanz neuer Bürotechnologie, 1).

Reithinger, S.; Grabmaier, C.; Huckauf, A.; Stefani, O.; Pross, A. (2017): The Myth of Baker-Miller Pink. Effects of Colored Light on Physiology, Cognition, and Emotion? In: Lighting engineering society of Slovenia (Hg.): EUROPEAN Lighting Conference: Proceedings, S. 182–186.

Rimmer, D. W.; Boivin, D. B.; Shanahan, T. L.; Kronauer, R. E.; Duffy, J. F.; Czeisler, C. A. (2000): Dynamic resetting of the human circadian pacemaker by intermittent bright light. In: *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 279 (5), S. 9.

Roenneberg, T. (2004): The Decline in Human Seasonality. In: *Journal of Biological Rhythms* 19 (3), S. 193–195. DOI: 10.1177/0748730404264863.

Roenneberg, T.; Kantermann, T.; Juda, M.; Vetter, C.; Allebrandt, K. V. (2013): Light and the Human Circadian Clock. In: Achim Kramer und Martha Merrow (Hg.): Circadian Clocks, Bd. 217. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Handbook of Experimental Pharmacology), S. 311–331.

Roenneberg, T.; Kuehnle, T.; Pramstaller, P. P.; Ricken, J.; Havel, M.; Guth, A.; Merrow, M. (2004): A marker for the end of adolescence. In: *Current Biology* 14 (24), S. R1038-R1039. DOI: 10.1016/j.cub.2004.11.039.

Roenneberg, T.; Wirz-Justice, A.; Mellow, M. (2003): Life between Clocks: Daily Temporal Patterns of Human Chronotypes. In: *Journal of Biological Rhythms* 18 (1), S. 80–90. DOI: 10.1177/0748730402239679.

Romm, J. J. (1999): Cool Companies. How the Best Businesses Boost Profits and Productivity by Cutting Greenhouse Gas Emissions. Washington, DC: Island Press.

Rosekind, Mark R.; Gregory, Kevin B.; Mallis, Melissa M.; Brandt, Summer L.; Seal, Brian; Lerner, Debra (2010): The Cost of Poor Sleep: Workplace Productivity Loss and Associated Costs. In: *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 52 (1), S. 91–98. DOI: 10.1097/JOM.0b013e3181c78c30.

Rosenthal, N. E.; Sack, D. A.; Carpenter, C. J.; Parry, B. L.; Mendelson, W. B.; Wehr, T. A. (1985): Antidepressant effects of light in seasonal affective disorder. In: *The American Journal of Psychiatry* 142 (2), S. 163–170. DOI: 10.1176/ajp.142.2.163.

Rosenthal, N. E.; Sack, D. A.; Gillin, J. C.; Lewy, A. J.; Goodwin, F. K.; Davenport, Y. et al. (1984): Seasonal affective disorder. A description of the syndrome and preliminary findings with light therapy. In: *Archives of General Psychiatry* 41 (1), S. 72–80. DOI: 10.1001/archpsyc.1984.01790120076010.

Rösler, F. (2011): Psychophysiologie der Kognition. Eine Einführung in die Kognitive Neurowissenschaft. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Rüger, M.; Gordijn, M. C.; Beersma, D. G.; Vries, B. de; Daan, S. (2003): Acute and Phase-Shifting Effects of Ocular and Extraocular Light in Human Circadian Physiology. In: *Journal of Biological Rhythms* 18 (5), S. 409–419. DOI: 10.1177/0748730403256650.

Rüger, M.; Gordijn, M. C.; Beersma, D. G.; Vries, B. de; Daan, S. (2005): Nasal versus Temporal Illumination of the Human Retina: Effects on Core Body Temperature, Melatonin, and Circadian Phase. In: *Journal of Biological Rhythms* 20 (1), S. 60–70. DOI: 10.1177/0748730404270539.

Sammito, S. (2014): Nutzung der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilität in der Arbeitsmedizin und der Arbeitswissenschaft (Niveau S2k). In: *Umweltmedizin, Hygiene, Arbeitsmedizin : Organ der Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin, GHUP* 19 (2), S. 129–130. Online verfügbar unter <http://www.ecomed-medicin.de/sj/uha/inhalt/Band/19/Ausgabe/2/Jahrgang/2014>.

Schauss AG: Application of behavioral photobiology to human aggression: Baker-Miller pink. In: *The International Journal for Biosocial Research*, Bd. 7, S. 55–64.

Schönecker, H. (1985): Kommunikationstechnik und Bedienerakzeptanz. München: CW-Publikationen (CW-Edition, 6).

Schulte-Marktwort (2010): Laborstudie zur Replizierung der Wirksamkeit von dynamischen Licht im Schulunterricht. Studie II: Ergebnisbericht. Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, Klinik und Poliklinik für Kinder- und Jugendpsychosomatik. Online verfügbar unter http://www.uke.de/kliniken/kinderpsychiatrie/downloads/test-klinik/Ergebnisbericht_Labor1.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2014.

Schweizer, C.; Edwards, R. D.; Bayer-Oglesby, L.; Gauderman, W. J.; Ilacqua, V.; Jantunen, M. J. et al. (2007): Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. In: *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 17 (2), S. 170–181. DOI: 10.1038/sj.jes.7500490.

Sharp Corporation (2012): Sakura-Colored LED Light. Japan. Online verfügbar unter http://www.sharp-world.com/corporate/info/his/only_one/item/t49.html, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 13.04.2017.

Smith, S. W.; Rea, M. S. (1978): Proofreading under Different Levels of Illumination. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 8 (1), S. 47–52. DOI: 10.1080/00994480.1978.10748567.

Smith, Stanley W.; Rea, Mark S. (1982): Performance of a Reading Test under Different Levels of Illumination. In: *Journal of the Illuminating Engineering Society* 12 (1), S. 29–33.

Smolders, K. C.; Antal, A.; Corona, A.; Heijboer, M.; Keyes, E.; Pollmann, K.; Kort, Y. A. de (2012): Fact or fiction? Testing effects of suggested illuminance changes. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Niederlande.

Sommer, B. B.; Sommer, R. (1991): A Practical Guide to Behavioral Research. Tools and Techniques. 3. Aufl. New York: Oxford University Press.

Spehar, B.; Owens, C. (2012): When do luminance changes capture attention? In: *Attention, Perception & Psychophysics* 74 (4), S. 674–690. DOI: 10.3758/s13414-011-0266-8.

Stefani, O.; Bues, M.; Pross, A.; Spath, D.; Frey, S.; Anders, D. et al. (2010): Evaluation of Human Reactions on Displays with LED Backlight and a Technical Concept of a Circadian Effective Display. In: *SID Symposium Digest of Technical Papers* 41 (1), S. 1120. DOI: 10.1889/1.3499852.

Stefani, Oliver; Bues, Matthias; Pross, Achim; Mebben, Sandra; Westner, Philipp; Dudel, H.; Rudolph, H. (2012): Moving clouds on a virtual sky affect well-being and subjective tiredness positively. In: CIE 2012 "Lighting Quality and Energy Efficiency". Proceedings. Vienna: CIE, S. 113–122.

Steidle, Anna; Werth, Lioba (2013): Freedom from constraints: Darkness and dim illumination promote creativity. In: *Journal of Environmental Psychology* 35, S. 67–80. DOI: 10.1016/j.jenvp.2013.05.003.

Stepstone (2011): Der StepStone Employer Branding Report 2011. Hg. v. Stepstone. Online verfügbar unter http://www.stepstone.de/Ueber-StepStone/upload/StepStone_Employer_Branding_Report_2011_final.pdf, zuletzt geprüft am 27.02.2017.

Stevens, R. G. (2006): Artificial Lighting in the Industrialized World: Circadian Disruption and Breast Cancer. In: *Cancer Causes & Control* 17 (4), S. 501–507. DOI: 10.1007/s10552-005-9001-x.

Steyer, R.; Schwenkmezger, P.; Notz, P.; Eid, M. (1997): Der Mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). Handanweisung. 1. Aufl. Göttingen: Hogrefe Verlag.

DIN SPEC 5031-100: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, melanopische Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren.

Stroop, J. R. (1935): Studies of interference in serial verbal reactions. Nashville, Tenn: George Peabody College for Teachers (George Peabody College for Teachers. Contributions to education, no. 170).

Terman, M.; Lewy, A. J.; Dijk, D. J.; Boulos, Z.; Eastman, C. I.; Campbell, S. S. (1995): Light treatment for sleep disorders: consensus report. IV. Sleep phase and duration disturbances. In: *Journal of Biological Rhythms* 10 (2), S. 135–147. DOI: 10.1177/074873049501000206.

Terman, M.; Schlager, D.; Fairhurst, S.; Perlman, B. (1989): Dawn and Dusk Simulation as a Therapeutic Intervention. In: *Biological Psychiatry* 25 (7), S. 966–970. DOI: 10.1016/0006-3223(89)90276-X.

Terman, M.; Terman, J. S. (2006): Controlled Trial of Naturalistic Dawn Simulation and Negative Air Ionization for Seasonal Affective Disorder. In: *The American Journal of Psychiatry* 163 (12), S. 2126–2133. DOI: 10.1176/appi.ajp.163.12.2126.

Thapan, K.; Arendt, J.; Skene, D. J. (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. In: *The Journal of Physiology* 535 (1), S. 261–267. DOI: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00261.x.

Thayer, R. E. (1991): The Biopsychology of Mood and Arousal. New York: Oxford University Press.

Tosini, G.; Iuvone, P. M.; McMahon, D. G.; Collin, S. P. (Hg.) (2014): *The Retina and Circadian Rhythms*. New York: Springer New York.

Union Investment (2011): Wenn Sie an einen idealen Büroarbeitsplatz für sich selbst denken - was wäre Ihnen dabei besonders wichtig? Zitiert nach de.statista.com. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182887/umfrage/wichtige-kriterien-fuer-den-bueroarbeitsplatz/>, zuletzt geprüft am 27.02.2017.

University of Groningen (2012): Self-chosen Colored Light Induces Relaxation. EXPERIENCING LIGHT 2012: International Conference on the Effects of. Eindhoven, The Netherlands, 12-13 November. Experiencing Light 2012 Eindhoven: Eindhoven University of Technology Library. Online verfügbar unter <http://2012.experiencinglight.nl/doc/2.pdf>, zuletzt geprüft am 10.02.2015.

Urban, K. K.; Jellen, H. G. (1985): Der TSD-Z: Test zum schöpferischen Denken - Zeichnerisch. Hannover: Univ. Hannover, FB Erziehungswiss. I (Paper / HEFE. Arbeitsstelle Hochbegabten-Erziehung, -Forschung und Evaluation, 6).

Uttley, J.; Fotios, S.; Cheal, C. (2013): Satisfaction and illuminances set with user-controlled lighting. In: *Architectural Science Review* 56 (4), S. 306–314. DOI: 10.1080/00038628.2012.724380.

Vandahl, C. (2009): Optimale Beleuchtung bei Schichtarbeit. Literaturstudie. Technische Hochschule Illmenau, Illmenau.

Vandewalle, G.; Collignon, O.; Hull, J. T.; Daneault, V.; Albouy, G.; Lepore, F. et al. (2013): Blue Light Stimulates Cognitive Brain Activity in Visually Blind Individuals. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 25 (12), S. 2072–2085. DOI: 10.1162/jocn_a_00450.

Vandewalle, G.; Schmidt, C.; Albouy, G.; Sterpenich, V.; Darsaud, A.; Rauchs, G. et al. (2007): Brain Responses to Violet, Blue, and Green Monochromatic Light Exposures in Humans: Prominent Role of Blue Light and the Brainstem. In: *PLOS ONE* 2 (11), S. e1247. DOI: 10.1371/journal.pone.0001247.

Veitch, J. A.; McColl, S. L. (2001): A Critical Examination of Perceptual and Cognitive Effects Attributed to Full-Spectrum Fluorescent Lighting. In: *Ergonomics* 44 (3), S. 255–279. DOI: 10.1080/00140130121241.

Viola, A. U.; Gabel, V.; Chellappa, S. L.; Schmidt, C.; Hommes, V.; Tobaldini, E. et al. (2015): Dawn simulation light: a potential cardiac events protector. In: *Sleep Medicine* 16 (4), S. 457–461. DOI: 10.1016/j.sleep.2014.12.016.

Viola, A. U.; James, L. M.; Schlangen, L. J.; Dijk, D. J. (2008): Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. In: *Scandinavian journal of work, environment & health* 34 (4), S. 297–306.

Wang, J. Y.; Hanifin, J. P.; Rollag, M. D.; Brainard, G. C. (Hg.) (1998): Ocular Regulation of the Human Pineal Gland: The Significance of Total Retinal Exposure for Melatonin Suppression.

Weale, R. A. (1988): Age and the transmittance of the human crystalline lens. In: *The Journal of Physiology* 395 (1), S. 577–587. DOI: 10.1113/jphysiol.1988.sp016935.

Wokoun, William (1968): Effects of music on work performance. Aberdeen Proving Ground, Md: U.S. Army, Human Engineering Laboratories (U.S. Army. Technical memorandum 1-68).

Wood, B.; Rea, M. S.; Plitnick, B.; Figueiro, M. G. (2013): Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression. In: *Applied Ergonomics* 44 (2), S. 237–240. DOI: 10.1016/j.apergo.2012.07.008.

Wulff, Katharina; Porcheret, Kate; Cussans, Emma; Foster, Russell G. (2009): Sleep and circadian rhythm disturbances: multiple genes and multiple phenotypes. In: *Current opinion in genetics & development* 19 (3), S. 237–246. DOI: 10.1016/j.gde.2009.03.007.

Zeitzer, J. M.; Dijk, D. J.; Kronauer, R.; Brown, E.; Czeisler, C. (2000): Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. In: *The Journal of Physiology* 526 Pt 3, S. 695–702.

